

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento De Ingeniería Térmica y de Fluidos

Área de Ingeniería Térmica



PROYECTO FIN DE CARRERA

**ENSAYO, MODELADO Y MOTORIZACIÓN DE
BOMBAS DE MECATE**

Autor: M^º ISABEL MADRID MADRID

Director: ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Título: Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Autor: M^a Isabel Madrid Madrid

Director: Ulpiano Ruíz-Rivas Hernando

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a Ulpiano Ruíz-Rivas por la ayuda que me han prestado, ya que la realización y consecución del presente proyecto de fin de carrera no hubiese sido posible sin su colaboración.

Gracias compañeros de universidad por esos buenos ratos que hemos disfrutado, en especial agradecer a mis compañeros Manuel Patrón y Jacobo Mosquera por su apoyo durante toda la carrera, ya que sin su colaboración no habría podido alcanzar los objetivos propuestos.

Por último, y no por ello menos importante, agradecer a mis padres, mis hermanos y a mis amigos por todo el ánimo que me han dado durante toda la carrera.



RESUMEN

El siguiente proyecto se centra en el estudio de la motorización y simulación de las condiciones de campo de una bomba de agua, en este caso, de una bomba de mecate.

Durante el proyecto se ha estado estudiando los diferentes parámetros que afectaban a la extracción de agua, modelando el sistema con el fin de valorar y evaluar los resultados obtenidos. Con la investigación desarrollada se han podido extraer una serie de conclusiones respecto a la instalación ejecutada, que podrán ayudar a que aumente el rendimiento del sistema.

Para la realización de este trabajo, se ha hecho uso de varios materiales que ayudaron a la configuración del motor en la bomba y para llevar a cabo, con la máxima exactitud posible la toma de datos, se requirieron numerosos elementos de medida.



ABSTRACT

This Project focuses on the study of a water pump motorization, simulation and field conditions, in particular a mecate pump.

Parameters affecting water extraction have been analyzed during the development of the project, by modeling the system in order to asses and evaluate the obtained results. With the investigation performed, some conclusions regarding this installation have been extracted. These inferences will help to improve the performance of the system.

To accomplish this work, several materials were used, which helped to configure the motor of the pump, and a large quantity of measuring devices were required to carry on a data collection with high precision.



ÍNDICE DEL DOCUMENTO

1.	INTRODUCCIÓN.....	18
1.1.	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	20
1.2.	ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	21
2.	INSTALACIÓN DEL SISTEMA.....	22
2.1.	BOMBA DE MECATE.....	23
2.1.1.	Descripción y funcionamiento de la bomba de mecate.....	23
2.1.2.	Historia de la bomba de mecate.....	25
2.1.3.	Tipos de bombas de mecate.....	26
2.1.4.	Componentes de la bomba de mecate.....	35
2.2.	MOTORIZACIÓN DE BOMBA DE MECATE.....	42
2.2.1.	Componentes motor eléctrico.....	42
2.2.2.	Instalación para la motorización de la bomba de mecate.....	47
2.3.	ELEMENTOS DE MEDIDA.....	52
3.	CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DE LA INSTALACIÓN.....	58
3.1.	ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE FUNCIONAMIENTO.....	59
3.2.	CAUDAL.....	65
3.3.	RELACIÓN DE TRANSMISIÓN.....	67
3.4.	POTENCIAS DE TRABAJO.....	69
3.5.	RENDIMIENTOS.....	71
3.6.	FUERZA DE ROZAMIENTO.....	73
4.	CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA INSTALACIÓN.....	75
4.1.	RANGO DE FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN.....	76
4.1.1.	Freno.....	77
4.1.2.	Motor.....	82
4.2.	CAUDAL.....	83
4.2.1.	Toma de medidas sin sistema de frenado.....	84
4.2.2.	Toma de medidas con sistema de frenado.....	88



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

4.2.3.	Comparación resultados ideales y experimentales	90
4.2.4.	Caracterización teórica del caudal de pérdidas.....	94
4.2.4.1.	Caracterización teórica del caudal de pérdidas para $x < f < 0,55\text{Hz}$	95
4.2.4.2.	Caracterización teórica del caudal de pérdidas para $0,55 < f < 1\text{Hz}$	97
4.2.4.3.	Caracterización teórica del caudal de pérdidas para $f > 1,00\text{Hz}$	99
4.2.4.4.	Corrección del caudal teórico	100
4.2.5.	Caracterización teórica del caudal de pérdidas para bajas frecuencias	102
4.2.5.1.	Caracterización teórica del caudal de pérdidas estático en vacío	103
4.2.5.2.	Caracterización teórica del caudal de pérdidas a bajas frecuencias aportando potencia	106
4.2.6.	Recta de calibración del caudalímetro para corrección del caudal	114
4.2.7.	Corrección de los datos	117
4.3.	RELACIÓN DE TRANSMISIÓN.....	120
4.4.	POTENCIAS DE TRABAJO	122
4.5.	RENDIMIENTOS	131
4.6.	FUERZA DE ROZAMIENTO	142
5.	CONCLUSIONES	150
	NOMENCLATURA	153
	BIBLIOGRAFÍA	155
	ANEXOS	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de la bomba de mecate (Artículo “La bomba de sogá” de Alejandro Montecinos)	24
Figura 2. Instalación de la bomba de mecate con manivela del laboratorio de TGA	28
Figura 3. Instalación de bicicleta en la bomba de mecate del laboratorio TGA.....	30
Figura 4. Instalación de motor eléctrico en la bomba de mecate del laboratorio TGA.....	31
Figura 5. Aerogenerador para cargar baterías	33
Figura 6. Bomba de mecate de accionamiento animal.....	34
Figura 7. Soporte base bomba de mecate	35
Figura 8. Conjunto polea motriz de bomba de mecate	36
Figura 9. Estructura superior bomba de mecate	37
Figura 10. Tubería de acenso.....	38
Figura 11. Plano del pistón y pistón.....	38
Figura 12. Caja guía.....	39
Figura 13. Tubería de bajada	40
Figura 14. Nudo autoenlazado de cuerda (izquierda) y nudos para la fijación de pistones (derecha)	41
Figura 15. Motor de bicicleta, sin engranaje planetario (izquierda) y con engranaje planetario (derecha)	44
Figura 16. Controlador	44
Figura 17. Acelerador de puño	45
Figura 18. Manetas de freno	46
Figura 19. Sensor de pedaleo	46
Figura 20. Baterías	47
Figura 21. Uniones de la estructura soporte del motor.....	48
Figura 22. Estructura final del soporte del motor	49
Figura 23. Conexiones del controlador	50
Figura 24. Conexiones del motor eléctrico.....	51
Figura 25. Contador de volumen	53

Figura 26. Configuración del dinamómetro en la instalación.....	55
Figura 27. Dinamómetro digital.....	55
Figura 28. Multímetro digital.....	56
Figura 29. Metro de medida.....	57
Figura 30. Relación teórica entre fuerza dinamómetro-altura.....	64
Figura 31. Transmisión por cadena que representa la instalación del motor eléctrico en bomba de mecate.....	67
Figura 32. Bomba de mecate con sistema de frenado.....	78
Figura 33. Oscilación que se producía en el freno con la configuración manual de la bomba de mecate	79
Figura 34. Caudal experimental frente a frecuencia en bomba de mecate manual	86
Figura 35. Caudal experimental frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada	88
Figura 36. Caudal experimental frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada (diferentes alturas)	89
Figura 37. Caudal experimental frente a altura en bomba de mecate motorizada (diferentes alturas)	90
Figura 38. Comparación caudal teórico ideal y experimental frente a frecuencia.....	92
Figura 39. Diferencia entre caudal teórico ideal y experimental	93
Figura 40. Caudal de pérdidas tramo $x < f < 0,55\text{Hz}$	95
Figura 41. Recta de caudal de pérdidas tramo $0,27 < f < 0,55\text{Hz}$	97
Figura 42. Caudal de pérdidas tramo $0,55 < f < 1,00\text{Hz}$	98
Figura 43. Recta de caudal de pérdidas tramo $0,55 < f < 1,00\text{Hz}$	99
Figura 44. Comparación entre el caudal teórico y el experimental.....	101
Figura 45. Error relativo caudal teórico y experimental	102
Figura 46. Volumen de pérdidas en la tubería de ascenso	104
Figura 47. Caudal de pérdidas en vacío y dinámico.....	106
Figura 48. Caudal de pérdidas midiendo velocidad de descenso.....	110
Figura 49. Caudal de pérdidas midiendo velocidad de ascenso	112
Figura 50. Caudal de pérdidas midiendo velocidad de columna de agua (gráfica superior) y considerando la diferencia entre datos experimentales y teóricos (gráfica inferior)	113
Figura 51. Recta de calibración del aparato de medida volumétrico	116
Figura 52. Comparación del caudal teórico ideal y experimental corregido frente a frecuencia.....	117
Figura 53. Diferencia entre caudal teórico y experimental corregido	118
Figura 54. Comparación entre el caudal teórico y el experimental corregido.....	119

Figura 55. Giro del motor (altura constante)	120
Figura 56. Giro del motor (diferentes alturas).....	121
Figura 57. Potencia eléctrica frente a frecuencia (altura constante)	123
Figura 58. Relación entre la potencia mecánica del motor y la potencia eléctrica	124
Figura 59. Potencia motor frente a potencia eléctrica (altura constante).....	125
Figura 60. Potencia motor-rueda frente a frecuencia (altura constante).....	125
Figura 61. Potencia útil frente a frecuencia (altura constante).....	126
Figura 62. Potencia eléctrica frente altura	127
Figura 63. Potencia motor-rueda frente a potencia eléctrica (diferentes alturas)	128
Figura 64. Potencia motor-rueda frente a altura	128
Figura 65. Potencia útil frente a altura	129
Figura 66. Potencia útil frente a frecuencia (diferentes alturas).....	130
Figura 67. Rendimiento volumétrico frente a frecuencia (altura constante).....	132
Figura 68. Rendimientos mecánico frente a frecuencia (altura constante)	133
Figura 69. Rendimiento bomba de mecate frente a frecuencia (altura constante)	134
Figura 70. Rendimiento volumétrico frente a frecuencia (diferentes alturas).....	135
Figura 71. Rendimiento volumétrico frente a frecuencia (altura constante).....	136
Figura 72. Rendimiento volumétrico frente altura (frecuencia constante)	137
Figura 73. Rendimiento mecánico frente a frecuencia (diferentes alturas)	138
Figura 74. Rendimiento mecánico frente a frecuencia (altura constante)	138
Figura 75. Rendimiento mecánico frente altura (frecuencia constante)	139
Figura 76. Rendimiento bomba de mecate frente a frecuencia (diferentes alturas)	140
Figura 77. Rendimiento de bomba de mecate frente altura (frecuencia constante)	140
Figura 78. Cálculo de la fuerza de arrastre (Imágenes del Proyecto “Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate”).....	144
Figura 79. Fuerza de arrastre.....	146
Figura 80. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia	147
Figura 81. Fuerza de rozamiento frente a altura	149
Figura 82. Plano del motor eléctrico.....	163
Figura 83. Frecuencia de giro frente al tiempo bomba de mecate manual	169
Figura 84. Caudal (imagen superior) y trabajo útil (imagen inferior) frente a altura en bomba de mecate manual	172
Figura 85. Caudal (imagen superior) y trabajo útil (imagen inferior) frente a altura en bici-bomba	174



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Figura 86. Fuerza de rozamiento frente a tensión de las cuerdas para distinto número de pistones.....	181
Figura 87. Caudal experimental frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (63W a diferentes alturas).....	198
Figura 89. Caudal experimental frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (90W a diferentes alturas).....	199
Figura 90. Caudal experimental corregido a bajas frecuencias frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (90W a diferentes alturas)	199
Figura 91. Caudal experimental frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (117W a diferentes alturas).....	200
Figura 92. Caudal experimental frente a altura para potencia eléctrica constante (63W).....	201
Figura 94. Caudal experimental frente a altura para potencia eléctrica constante (90W).....	202
Figura 95. Caudal experimental corregido a bajas frecuencias frente a altura para potencia eléctrica constante (90W)	202
Figura 96. Caudal experimental frente a altura para potencia eléctrica constante (117W).....	203
Figura 97. Comparación caudal teórico ideal y experimental frente a frecuencia en bomba de mecate manual	204
Figura 98. Comparación caudal teórico ideal y experimental corregido a bajas frecuencias frente a frecuencia en bomba de mecate manual	204
Figura 99. Comparación caudal teórico ideal y experimental frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada	205
Figura 100. Comparación caudal teórico ideal y experimental corregido a bajas frecuencias frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada	205
Figura 101. Comparación caudal teórico ideal y experimental frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)	206
Figura 102. Comparación caudal teórico ideal y experimental corregido a bajas frecuencias frente a frecuencia en bomba de mecate manual (distintas alturas).....	206
Figura 103. Caudal de pérdidas en bomba de mecate manual	207
Figura 104. Caudal de pérdidas con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate manual	207
Figura 105. Caudal de pérdidas en bomba de mecate motorizada	208
Figura 106. Caudal de pérdidas con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada	208
Figura 107. Caudal de pérdidas en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)	209
Figura 108. Caudal de pérdidas con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)	209
Figura 109. Comparación caudal teórico y experimental en bomba de mecate manual	210

Figura 110. Comparación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate manual	210
Figura 111. Comparación caudal teórico y experimental en bomba de mecate motorizada ...	211
Figura 112. Comparación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada	211
Figura 113. Comparación caudal teórico y experimental en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)	212
Figura 114. Comparación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)	212
Figura 115. Desviación caudal teórico y experimental en bomba de mecate manual	213
Figura 116. Desviación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate manual	213
Figura 117. Desviación caudal teórico y experimental en bomba de mecate motorizada	215
Figura 118. Desviación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada	215
Figura 119. Desviación caudal teórico y experimental en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)	216
Figura 121. Trabajo frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (63W a distintas alturas)	218
Figura 122. Trabajo frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (90W a distintas alturas)	218
Figura 123. Trabajo frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (117W a distintas alturas)	219
Figura 124. Trabajo frente a altura para potencia eléctrica constante (63W)	219
Figura 125. Trabajo frente a altura para potencia eléctrica constante (90W)	220
Figura 126. Trabajo frente a altura para potencia eléctrica constante (117W)	220
Figura 127. Rendimiento bomba de mecate frente a frecuencia (altura constante)	221
Figura 128. Rendimiento bomba de mecate frente a altura (frecuencia constante)	221
Figura 129. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (63W)	222
Figura 130. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (90W)	222
Figura 131. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (117W)	223
Figura 132. Fuerza de rozamiento frente a altura para potencia eléctrica constante (63W) ...	223
Figura 133. Fuerza de rozamiento frente a altura para potencia eléctrica constante (90W) ...	224



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Figura 134. Fuerza de rozamiento frente a altura para potencia eléctrica constante (117W) .	224
Figura 135. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia (altura constante)	225
Figura 136. Fuerza de rozamiento frente a altura (frecuencia constante)	225
Figura 137. Comparación caudal frente a frecuencia con configuración manual y motorizada.....	226
Figura 138. Comparación caudal frente a altura con configuración manual, con bicicleta y motorizada	227



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Medidas de la manivela de acero	27
Tabla 2. Capacidad de bombeo bomba de mecate con manivela (Información “ropepumps.org”).....	28
Tabla 3. Capacidad de bombeo bici-bomba de mecate	30
Tabla 4. Capacidad de bombeo bomba de mecate motorizada (Información “ropepumps.org”).....	32
Tabla 5. Capacidad de bombeo bomba de mecate accionada por animales (Información “ropepumps.org”).....	34
Tabla 6. Relación de transmisión.....	68
Tabla 7. Duración de las pastillas de freno.....	81
Tabla 8. Parámetros considerados durante la toma de medidas con sistema de frenado.....	89
Tabla 9. Caudal de pérdidas trabajando en vacío para una frecuencia anterior de 0,44 Hz.....	104
Tabla 10. Caudal de pérdidas trabajando en vacío para una frecuencia anterior de 0,73 Hz....	105
Tabla 11. Frecuencia para el cálculo de la velocidad de descenso de la columna de agua	108
Tabla 12. Cálculo de la velocidad de descenso de la columna de agua	108
Tabla 13. Caudal de pérdidas calculando velocidad de descenso de la columna de agua	109
Tabla 14. Frecuencia para el cálculo de la velocidad de ascenso de la columna de agua	111
Tabla 15. Cálculo de la velocidad de ascenso de la columna de agua	111
Tabla 16. Caudal de pérdidas calculando velocidad de ascenso de la columna de agua	111
Tabla 17. Toma de datos para calibración del caudalímetro	115
Tabla 18. Resultados de la fuerza de arrastre para pruebas a distintas frecuencias.....	145
Tabla 19. Dimensionado de los elementos que conforman bomba de mecate.....	161
Tabla 20. Hoja de características del motor eléctrico.....	162
Tabla 21. Relación teórica entre fuerza dinamómetro-altura.....	167
Tabla 22. Toma de datos a frecuencia no constante en bomba de mecate manual	168
Tabla 23. Toma de datos a frecuencia constante en bomba de mecate manual.....	170
Tabla 24. Toma de datos a frecuencia no constante con sistema de frenado en bomba de mecate manual	171

Tabla 25. Toma de datos a frecuencia no constante con sistema de frenado en bici-bomba ..	173
Tabla 26. Toma de datos con relación de transmisión 48/13 en bomba de mecate motorizada.....	175
Tabla 27. Toma de datos con relación de transmisión 48/19 en bomba de mecate motorizada.....	176
Tabla 28. Toma de datos con relación de transmisión 48/13 y sistema de frenado en bomba de mecate motorizada	177
Tabla 29. Toma de datos con relación de transmisión 48/19 y sistema de frenado en bomba de mecate motorizada	178
Tabla 30. Toma de datos fuerza de rozamiento tubería-pistón utilizando 4 pistones	179
Tabla 31. Toma de datos fuerza de rozamiento tubería-pistón utilizando 8 pistones	180
Tabla 32. Caudal teórico sin tener en cuenta las pérdidas (caudal ideal) en bomba de mecate manual	183
Tabla 33. Caudal teórico sin tener en cuenta las pérdidas (caudal ideal) en bomba de mecate motorizada	184
Tabla 34. Caudal teórico sin tener en cuenta las pérdidas (bomba de mecate ideal) con sistema de frenado en bomba de mecate motorizada.....	185
Tabla 35. Corrección del caudal teórico en bomba de mecate manual.....	186
Tabla 36. Corrección del caudal teórico en bomba de mecate motorizada	187
Tabla 37. Corrección del caudal teórico con sistema de frenado en bomba de mecate motorizada	188
Tabla 38. Corrección del caudal teórico con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate manual.....	189
Tabla 39. Corrección del caudal teórico con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada.....	190
Tabla 40. Corrección del caudal teórico con caudal experimental corregido a bajas frecuencias con sistema de frenado en bomba de mecate motorizada	191
Tabla 41. Potencias a altura constante (4,2 m) en bomba de mecate motorizada	192
Tabla 42. Potencias a diferentes alturas en bomba de mecate motorizada.....	193
Tabla 43. Rendimientos a altura constante (4,2 m) en bomba de mecate motorizada	194
Tabla 44. Rendimientos a diferentes alturas en bomba de mecate motorizada	195
Tabla 45. Fuerza de rozamiento a altura constante (4,2 m) en bomba de mecate motorizada.....	196
Tabla 46. Fuerza de rozamiento a diferentes alturas en bomba de mecate motorizada	197



1. INTRODUCCIÓN

El proyecto contenido en esta memoria se engloba dentro de las labores del *Grupo de Tecnologías Apropriadas (GTA)*, contenido en el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid. El GTA nació para ayudar a resolver diferentes problemas en las sociedades empobrecidas y servir de herramienta para conseguir un desarrollo sostenible en dichas sociedades. Sus funciones son encargarse de coordinar proyectos desarrollados tanto en los laboratorios que dispone en la universidad como con el apoyo de varias ONG's en el extranjero.

Las líneas de trabajo en las que se centra se dividen en:

- Agua
 - Sistema de bombeo de agua
 - Sistemas de potabilización de agua
- Energía
 - Sistema solares térmicos
 - Sistemas de biodigestión para producción de biogás a partir de residuos orgánicos
 - Producción de electricidad

En este caso, el proyecto se engloba en los sistemas de bombeo de agua y tuvo lugar en el laboratorio 1.65, en las instalaciones que posee la universidad



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

en la Avenida del Mediterráneo, número 22 en Leganés. Disponiendo el laboratorio de una estructura colíndate formada por tres plataformas sobre las que se encuentran desarrollados los bancos de ensayos, en este caso, tres tipos de bombas manuales de agua.

Este proyecto da continuidad a estudios previos realizados en una de las bombas de agua de la instalación mencionada, bomba de mecate. Cada uno de los proyectos anteriores ha diseñado, construido, mejorado y caracterizado la bomba de mecate para aportar diferentes conclusiones: "Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate", "Instrumentación, adquisición de datos y ensayos de bici-bombas de mecate", "Instrumentación, adquisición de datos para laboratorio multidisciplinar y motorización de bomba manual de mecate" y "Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate".



1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

La bomba de mecate consiste en un sistema manual de bombeo para extraer agua del subsuelo por medio de una cuerda. Su nacimiento fue debido a la necesidad de abastecimiento de agua por medio de un mínimo esfuerzo físico, ayudando para su consolidación el considerarse una de las más factibles bombas de mano puesto que, el concepto de mantenimiento cambia, pudiendo realizarlo la propia población en un tiempo ínfimo, al disponer de requerimientos tecnológicos mínimos y de fácil acceso. Por lo que, en pocos años esta instalación ha poseído un índice de popularidad muy elevado en los países subdesarrollados, debido a su bajo coste económico y facilidad de mantenimiento.

El proyecto realizado está basado en una instalación previa de este dispositivo y además, pretende dar continuidad a los modelos y caracterización obtenidos en años anteriores, tanto los que se obtuvieron manualmente, por medio de una manivela, como los obtenidos por otros sistemas de transmisión manual, bicicleta. Es por ello, que durante este proyecto se instaló un motor eléctrico en la bomba de mecate con el objetivo de caracterizar la instalación, sin tener en cuenta el cansancio físico que se podía producir con sistemas de transmisión manuales, los cuales provocan la obtención de velocidades no constantes, que no ayudan a caracterizar y a estudiar correctamente los caudales, las potencias de trabajo y los rendimientos que se producen en este tipo de instalaciones. Por lo que, se estudiaron los parámetros que caracterizaron esta nueva configuración, a frecuencia constante, y se compraron con los anteriores.

Por lo tanto, el objetivo principal fue caracterizar los diferentes parámetros que intervenían en la bomba de mecate, analizando su importancia en el sistema, de una forma exacta y clarividente.



1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

La estructura de este proyecto se encuentra dividida en varios apartados, distinguiéndose los primeros apartados donde se especifica el funcionamiento de la bomba de mecate, la instalación llevada a cabo durante la motorización y los dispositivos de medida utilizados durante la toma de datos para el modelado de la bomba.

Para después realizar una comprensión teórica de los parámetros a analizar, definiendo los resultados que se van a recoger mediante las diversas pruebas. En este caso, la caracterización del freno, la caracterización del caudal y de la potencia de trabajo, así como la eficiencia o rendimiento del motor y de la bomba fueron los parámetros más representativos estudiados.

Produciéndose en el siguiente capítulo, la recogida de los datos experimentales, analizándose éstos en diferentes gráficas y tablas, para caracterizar el comportamiento de la instalación. Modelando el trabajo necesario para extraer agua a diferentes alturas y el caudal de pérdidas durante el funcionamiento de la bomba, tanto en modo manual, manivela, como eléctricamente, por medio del motor.

Por último, se definen las conclusiones que se fueron obteniendo a medida que se iban realizando los ensayos en la bomba de mecate con el motor eléctrico, las cuales ayudarán a mejorar algunos factores de la instalación con el fin de aumentar el rendimiento del sistema.



2. INSTALACIÓN DEL SISTEMA

Para analizar y caracterizar la bomba de mecate, fue necesario conocer la instalación, comprendiendo la función que desarrolla cada uno de los elementos que la conforman, durante el desarrollo de su actividad principal como era la extracción de agua. Además, se resumió en un estudio las diferentes configuraciones que puede poseer la bomba de mecate, explicando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, ya que anteriormente a este proyecto, se había procedido a realizar estudios según las mismas.

También, fue necesario definir la forma de configuración e instalación del motor eléctrico a la bomba de mecate, de una forma tal que se pudiera adecuar al sistema de extracción de agua, sin interferir en las funciones de la bomba, con el objetivo de poder obtener rendimientos máximos con la instalación del motor.

Por último, se estudiaron los elementos de medida necesarios para la toma de datos y la configuración de éstos en la instalación. Apartado fundamental, ya que sin éstos no habría sido posible la realización de todos los ensayos y la captura de los datos.

En definitiva, estos estudios se originaron como consecuencia para entender el funcionamiento del conjunto del sistema (bomba de mecate + motor eléctrico) perfeccionando y optimizando el movimiento de la articulación.



2.1. BOMBA DE MECATE

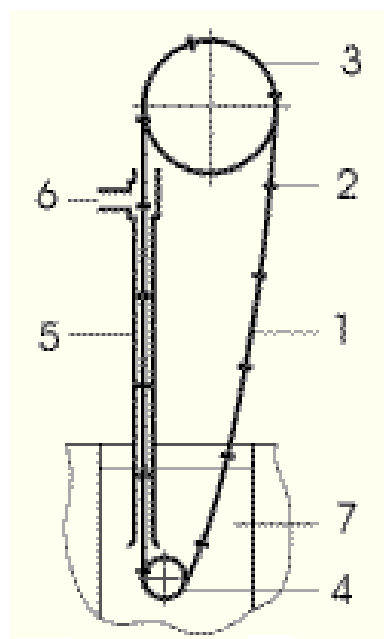
2.1.1. Descripción y funcionamiento de la bomba de mecate

La bomba de mecate consiste en un sistema u artefacto, con el cual se puede extraer agua del subsuelo hasta la superficie o nivel deseado, por medio de un mecanismo constituido por una cuerda (mecate) autoenlazada.

A la cuerda se encuentran anudados unos tapones, realizándose éstos con un material flexible (plástico, tela, goma, etc.), y colocándose a una distancia de intervalos determinados (entre 30-500 cm). Esta cuerda asciende desde el pozo a la superficie a través de una tubería de PVC. La tubería tiene que poseer un diámetro proporcional a los tapones anudados en la cuerda puesto que, éstos funcionan en el sistema como pistones mientras que la tubería de PVC funciona como un cilindro, por lo que, la holgura entre ambos elementos tiene que ser mínima, para poder levantar agua. En la zona superior de la tubería existe una derivación que permite que el agua extraída sea descargada al recipiente o envase de almacenamiento.

La cuerda se coloca alrededor de una polea motriz (rueda de bicicleta, rueda de motocicleta, etc.), situada en la superficie o en el nivel que se desea alcanzar durante la extracción del agua. A su vez, también se hace pasar la cuerda por el nivel inferior, a través de una caja guía de fondo, la cual consta de un mecanismo cilindro que guía a la cuerda hacía la tubería de ascenso. De esta forma el sistema puede funcionar como un mecanismo cerrado, permitiendo la elevación del líquido.

A continuación, se muestra una imagen donde se puede apreciar los componentes principales de la bomba de mecate, todos ellos se encuentran instalados en la bomba de mecate utilizada para las pruebas y ensayos:



- 1 *Cuerda*
- 2 *Pistones*
- 3 *Polea motriz*
- 4 *Guía inferior*
- 5 *Tubería de ascenso*
- 6 *Tubería de descarga*
- 7 *Pozo*

Figura 1. Componentes de la bomba de mecate (Artículo “La bomba de sogá” de Alejandro Montecinos)

Por medio de este mecanismo se consiguió un sistema de funcionamiento de cuerda sinfín, por medio del cual y accionándolo en circuito cerrado, hacía posible mover hasta la superficie gran cantidad de agua. Al hacer girar la polea motriz, se producía la ascensión de la cuerda y con ella el movimiento de los pistones por la tubería, en una sola dirección, por lo que se “succionaba” el agua hacia la superficie. Dichos pistones empujaban la columna de agua en la parte de arriba y succionaban otra columna de agua en la parte de abajo, produciéndose el levantamiento de la columna de agua.

La bomba de mecate es utilizada en comunidades pequeñas, pudiendo instalarse en pozos excavados o perforados, los cuales tienen que poseer un diámetro mínimo de 100 mm, para que puedan ser ensamblados y ubicados correctamente todos los elementos. La profundidad máxima a la que se suelen instalar estas bombas es inferior a 40 m, debido a que a mayores profundidades la potencia a suministrar por un usuario debe ser muy elevada, no pudiendo llegar a los mismos.

En definitiva, como se puede apreciar en la imagen anterior, la bomba de mecate representa un diseño simple y de operación sencillo que puede ser explotado por la propia comunidad. El uso de dicho dispositivo puede ser muy extenso, dependiendo de la población, pudiéndose utilizar para el abastecimiento de agua a poblaciones en comunidades con deficiente suministro de agua o para propósitos agrícolas o ganaderos, a pequeña escala.

2.1.2. Historia de la bomba de mecate

La tecnología mencionada en este proyecto, empezó a ser desarrollada con el apoyo de las agencias de cooperación internacional a partir de los años ochenta. Apareciendo la primera de las bombas en Nicaragua, en 1983, en la provincia de Estelí, con la instalación de un prototipo en un pozo de 18 metros.

Inicialmente, la bomba de mecate se fabricaba de modo muy artesanal, formada por una rueda de madera y tapones de caucho, pero en la década de los noventa, aproximadamente entre 1990 y 1995, se logró un gran avance dando paso a multitud de desarrollos de este tipo de bombas.

Desde ese instante varios han sido los organismos y organizaciones encargados de realizar cambios y mejoras, tanto en su forma como en sus componentes, sin perder en ningún momento la sencillez tecnológica y la facilidad para conseguir los materiales que permiten su fabricación.

Por lo que, gracias a la labor de diferentes agencias y ONG's que trabajaban en conjunto, realizándose una transferencia tecnológica real, se permitió que la tecnología se arraigara en el sector, aceptando las diferentes comunidades, la bomba de mecate como medio de explotación de las aguas subterráneas. A su vez, numerosas empresas se han sumado a la explotación y fabricación de este tipo de sistemas de bombeos, no obstante, el hecho de que el

mercado de las bombas se desarrolle a la sombra de la existencia de proyectos de agua y saneamiento le hace dependiente de estos.

En los países subdesarrollados ha sido tal su aceptación que en Nicaragua, la tecnología se difundió rápidamente por todo el país, utilizando el 25% de la población rural bombas de mecate. También se utilizan en otras partes de América Central, con más de 25.000 bombas instaladas. A finales de 2009, se estimó que más de 4 millones de personas en 20 países de todo el mundo estaban usando bombas de mecate de agua para uso doméstico y riego.

Actualmente y durante la década del 2000, la bomba de mecate ha sido ampliamente utilizada, desarrollándose varios modelos innovadores de configuraciones con este tipo de bomba, como fue el caso de la bici bomba, de la bomba aérea y de la bomba motorizada (estudio desarrollado en este proyecto). En continentes como África, la bomba de mecate se está utilizando por medio de energía solar.

Es por todo ello, que el proyecto desarrollado tiene una importancia fundamental para seguir incentivando esfuerzos que hagan posible la mejora de este tipo de instalaciones, que como se ha mostrado tiene una relevancia fundamental en numerosos países.

2.1.3. Tipos de bombas de mecate

Como se ha especificado anteriormente existen numerosas configuraciones para la bomba de mecate, con cada una de ellas se obtienen diversas prestaciones, siendo las capacidades de bombeo diferentes. A continuación, se va a proceder a realizar un resumen de las principales, algunas de las cuales ya han sido configuradas en la instalación de bomba de mecate utilizada durante el proyecto, y que presentan una relevancia fundamental en este proyecto, debido a diversas comparaciones que se van a establecer:

- **Bomba de Mecate Manual**

La bomba manual consiste en instalar una manivela en el eje de la polea motriz y así facilitar la aportación de potencia por parte de una persona. La manivela que se construyó para el proyecto fue de acero, a la cual, se le aportó un revestimiento con pintura antioxidante para metales, con el objetivo de aumentar las propiedades anticorrosivas del material en condiciones adversas, como eran las que se encontraban en el laboratorio de la instalación, agua, humedad, etc.

La manivela se diseñó para que fuera doblada 90° en dos lugares, formando dos codos en la barra. Dimensionándose de esta forma con el fin de disminuir la fuerza necesaria para imprimir, por parte del usuario, el movimiento rotativo al eje, siendo más cómodo la extracción de agua. Además, se le añadieron en dichos codos unas pletinas consiguiendo mejor distribución de esfuerzos, ya que ambos puntos sufrían una alta concentración de tensiones. Las medidas consideradas fueron las siguientes:

Longitud eje (mm)	220
Longitud brazo (mm)	270
Longitud empuñadura (mm)	400
Diámetro (mm)	22

Tabla 1. Medidas de la manivela de acero

A continuación se ofrece una imagen de la bomba de mecate configurada con la manivela definida:



Figura 2. Instalación de la bomba de mecate con manivela del laboratorio de TGA

Numerosos estudios han demostrado la capacidad de bombeo con la manivela, siendo ésta representada a continuación:

Altura (m)	Caudal (l/min)
10	40
40	10
60 ¹	7

Tabla 2. Capacidad de bombeo bomba de mecate con manivela (Información “ropepumps.org”)

Durante las pruebas realizadas con manivela en la instalación, se pudo llegar alcanzar los 10 metros de altura, obteniendo un caudal igual a 24,5

¹ Los estudios a 60 m están basado en la utilización de una manivela doble, para así poder mover el eje motriz en ambos lados y realizar el esfuerzo entre dos personas.

litros en un minuto puesto que, se consideran diferentes parámetros de operación, así como un diseño más simplificado de la instalación de mecate, con la utilización de materiales reciclados y fáciles de conseguir.

- **Bici-Bomba**

La bici-bomba es una bomba de mecate impulsada o manejada por medio de pedales, utilizando una bicicleta. Mediante el uso de este sistema se obtiene mayores ventajas, entre ellas destaca el aumento del rendimiento, siendo aproximadamente un 50% más alto que el modelo realizado con la bomba manual, aunque sus costes se incrementan.

Su funcionamiento es el mismo que la bomba de mecate, con la diferencia de que la fuerza motriz no se ejerce con los brazos del usuario, sino con las piernas al pedalear y poner en movimiento el eje de giro. Y teniendo en cuenta que los seres humanos desarrollan más potencia en las piernas que en los brazos, el accionar este sistema implica menor agotamiento físico y mayor productividad.

Se ha de remarcar que los datos que se obtuvieron con la bicicleta para la comparación de resultados en esta memoria técnica se recogieron de la investigación que llevó a cabo Manuel Patrón en el proyecto “Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate”.



Figura 3. Instalación de bicicleta en la bomba de mecate del laboratorio TGA

El caudal de agua bombeada va ligado a la relación de transmisión que se instale en ambos platos, del diámetro del tubo de subida, la altura de bombeo y el diámetro de la llanta. Las investigaciones llevadas a cabo por “ropepumps.org” establecían una capacidad de bombeo de 60 l/min para un pozo de 10 metros. En la instalación presente en la universidad constando de las siguientes características se obtenía:

Relación de transmisión	44/48
Diámetro polea motriz (mm)	198
Diámetro tubería ascenso (mm)	27,2
Altura (m)	10
Caudal (l/min)	31,25
Potencia (W)	51,70

Tabla 3. Capacidad de bombeo bici-bomba de mecate

Este tipo de bombas se suele utilizar para el abastecimiento de agua al sector ganadero.

- **Bomba de Mecate Motorizada**

La bomba de mecate puede ser impulsada por motor eléctrico, diesel o gasolina:

- *Bomegas*: Bomba de mecate con motor de gasolina.
- *Bomelec*: Bomba de mecate con motor eléctrico.

En esta memoria se estudió y se caracterizó el modelo de bomba de mecate impulsada por motor eléctrico. El funcionamiento es similar que en los anteriores tipos de bombas, sólo que en este caso se conecta al eje motriz de la bomba de mecate un motor eléctrico, mediante una cadena o correa, pudiendo de esta forma transmitir el par motor a la instalación.

A continuación se muestra una imagen de la instalación del laboratorio, donde se observa la bomba de mecate motorizada:



Figura 4. Instalación de motor eléctrico en la bomba de mecate del laboratorio TGA

En algunos lugares como en Nicaragua, ya se han instalado algunas de estas bombas con las siguientes características:

	Bomelec	Bomegas 1	Bomegas 2
Motor (HP)	0,5 - 1	1	1
Consumo de gasolina (l/h)	----	0,4 - 0,6	0,4 - 0,6
Profundidad de bombeo (m)	25	35	45
Elevación sobre nivel de tierra (m)	1 - 6	1 - 6	1 - 6
Caudal (a 10 m) (l/min)	25	40	50
Costo (US\$)	300	350	400

Tabla 4. Capacidad de bombeo bomba de mecate motorizada (Información “ropepumps.org”)

Aunque todavía no es un modelo muy utilizado en los países subdesarrollados, poco a poco se está intentando implementar, puesto que permite una capacidad de bombeo superior a mayores profundidades.

Es por ello, que la bomelec puede incorporar unos aerogeneradores de viento que permiten cargar las baterías para el funcionamiento del motor. El molino de viento para cargar baterías posee un rotor de baja velocidad formado por 3 a 5 aspas que accionan un generador de 100 W, siendo la velocidad de comienzo de generación aproximadamente para 3 m/s.



Figura 5. Aerogenerador para cargar baterías

También existen otro tipo de configuraciones en las bombas de mecate que no se estudiaran durante este proyecto, pero a continuación se mencionan y explican en qué consisten para aportar mayor información al sistema considerado:

- **Accionamiento animal**

Este tipo de bomba está accionada por tracción animal, caballo, mulo, etc. Combina la bomba de mecate con una transmisión angular y la capacidad de bombeo es 4 veces superior a la bomba manual. El mantenimiento consiste en limpiar los dientes de transmisión y lubricar los cojinetes regularmente.



Figura 6. Bomba de mecate de accionamiento animal

Las especificaciones más comunes de este tipo de bomba son:

Profundidad del pozo (m)	10	20	30	50	70
Caudal (l/min)	120	60	45	20	14
Tubo de bombeo (mm)	50,8	38,1	25,4	19,05	12,7
Diagrama mínimo (pozo de tubo) (mm)	127	101,6	101,6	76,2	76,2
Costo (US\$)	390	390	450	470	500

Tabla 5. Capacidad de bombeo bomba de mecate accionada por animales (Información "ropepumps.org")

- **Viento**

Se denomina aerobomba de mecate y se encarga de combinar la bomba de mecate con un molino de viento. Actualmente existen dos modelos de aerobombas de mecate:

- Modelo 270: Funciona con vientos que cambian de dirección dentro de 270°. Por ejemplo, vientos estacionales.
- Modelo 360: Funciona para todas las direcciones del viento.

2.1.4. Componentes de la bomba de mecate

La bomba de mecate sobre la que se realizaron las diferentes pruebas estaba formada por varios elementos, todos ellos en conjunto provocaban el funcionamiento y extracción de agua con un caudal determinado.

- **Soporte:** Permitió la colocación de la polea motriz con su eje, de forma tal que ésta quedara sobre la superficie, encima del depósito. La estructura estuvo constituida por 12 barras angulares de 12 mm, formando un prisma rectangular, encontrándose las barras de la base ancladas al suelo. Además se instalaron barras laterales para evitar que la estructura pandease o se deformase, aportando gran rigidez cuando se simulaban mayores alturas. Todas las barras fueron unidas por tornillería de métrica 10, con el objetivo de normalizar toda la instalación.



Figura 7. Soporte base bomba de mecate

- **Polea motriz:** La polea motriz estuvo formada por un conjunto de elementos que permitieron la subida de la cuerda, estando formada por la rueda, el eje y los cojinetes, pudiendo ser instalada también la manivela sobre el eje.

En este caso, la polea motriz se configuró utilizando una rueda de motocicleta, revestida con una llanta usada de una vieja motocicleta,

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

utilizando además dos cejas de llanta como medio de tracción o de arrastre de los pistones encargados de bombear el agua. En la rueda se dispusieron diversos elementos que sirvieron para caracterizar de una manera eficaz la instalación de la bomba de mecate, como fue la colocación de un plato dentado y un disco de freno, estos elementos fueron ubicados en los extremos opuestos del eje de la rueda. El plato dentado fue de 48 dientes y se instaló para poder llevar a cabo la transmisión de movimiento desde el motor a la rueda. Para unir el plato-rueda fue necesario realizar cinco taladros, con un torno de control numérico (realizado en oficina técnica de la universidad). En el otro extremo de la rueda, se encontraba ubicado el disco de freno, con el objetivo de poder caracterizar la instalación midiendo la fuerza que se ejercía en cada momento sobre el eje de la bomba de mecate.



Figura 8. Conjunto polea motriz de bomba de mecate

En esta instalación, también se encontraron dos cojinetes rectangulares de madera con un agujero pasante, que permitieron el giro del eje, además de soportar la polea motriz sobre la estructura base. La sujeción de los cojinetes a la estructura principal se realizó por medio de unas

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

pletinas metálicas, unidas a la estructura soporte por medio de tornillos de gran longitud.

Por último, se pudo apreciar el eje, cuya función fue servir de soporte a la rueda y al disco de freno, girando de forma solidaria con éstos, permitiendo incorporarse en el eje, la manivela, por medio de unos taladros que pudieron unir ambos elementos.

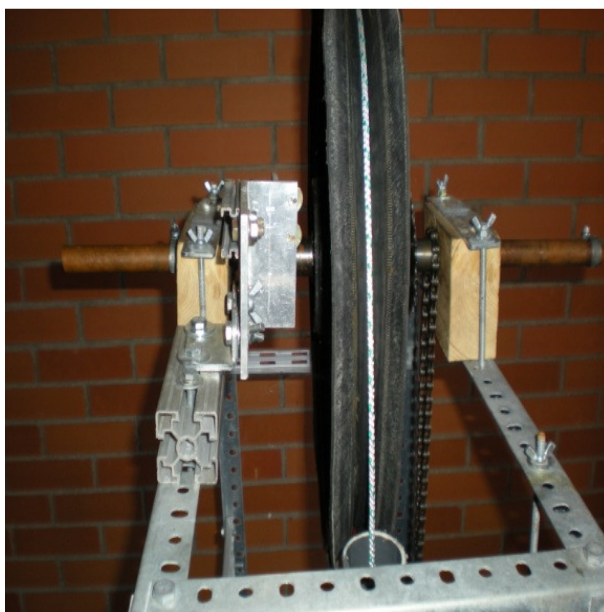


Figura 9. Estructura superior bomba de mecate

- **Tubería de ascenso:** La tubería de ascenso estaba formada por un conjunto de tuberías de PVC. Parte de la tubería de ascenso, concretamente 2,6 metros, fue fabricada de PVC transparente para facilitar el estudio de funcionamiento de la bomba, cuando los pistones elevaban el agua. El diámetro a utilizar dependió de la profundidad del pozo y en su ensamblaje debió cumplirse algunos requerimientos básicos. El extremo inferior del tubo de subida debió tener forma de campana para que permitiera el paso fluido de la cuerda con los pistones, sin que se produjera daño en éstos últimos. En el extremo superior de la tubería de subida se acopló un codo, que permitió la desviación del agua hasta el recipiente.



Figura 10. Tubería de ascenso

- **Pistones:** En este caso, los pistones fueron fabricados por medio de tapones de plástico, los cuales se cocieron hasta obtener un material líquido y se dejaron enfriar en un molde con una forma determinada. Una vez que se obtuvo el pistón, se le practicó un agujero en el centro para permitir el paso de la cuerda.

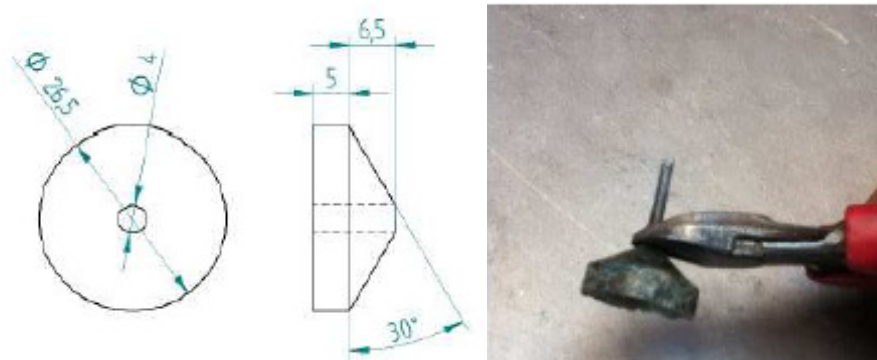


Figura 11. Plano del pistón y pistón

Su diámetro exterior dependió del diámetro interior de la tubería de subida, ya que siempre se debía dejar una holgura entre el pistón y el

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

tubo para evitar que se atasgaran. La distancia entre cada pistón varió 1 m, debiéndose considerar esta distancia mayor a medida que aumentase la profundidad del pozo.

- **Guía inferior:** Se construyó una caja de acero inoxidable, colocándose en el fondo del pozo, en este caso del depósito. A ésta se le añadió una botella que fue la encargada de guiar la cuerda más los pistones a la tubería de ascenso, sin que se produjeran roces ni desgastes. Dicha botella fue rellena con piedras y arena, para actuar como contrapeso, manteniendo la tubería en una posición lo más perpendicular posible.

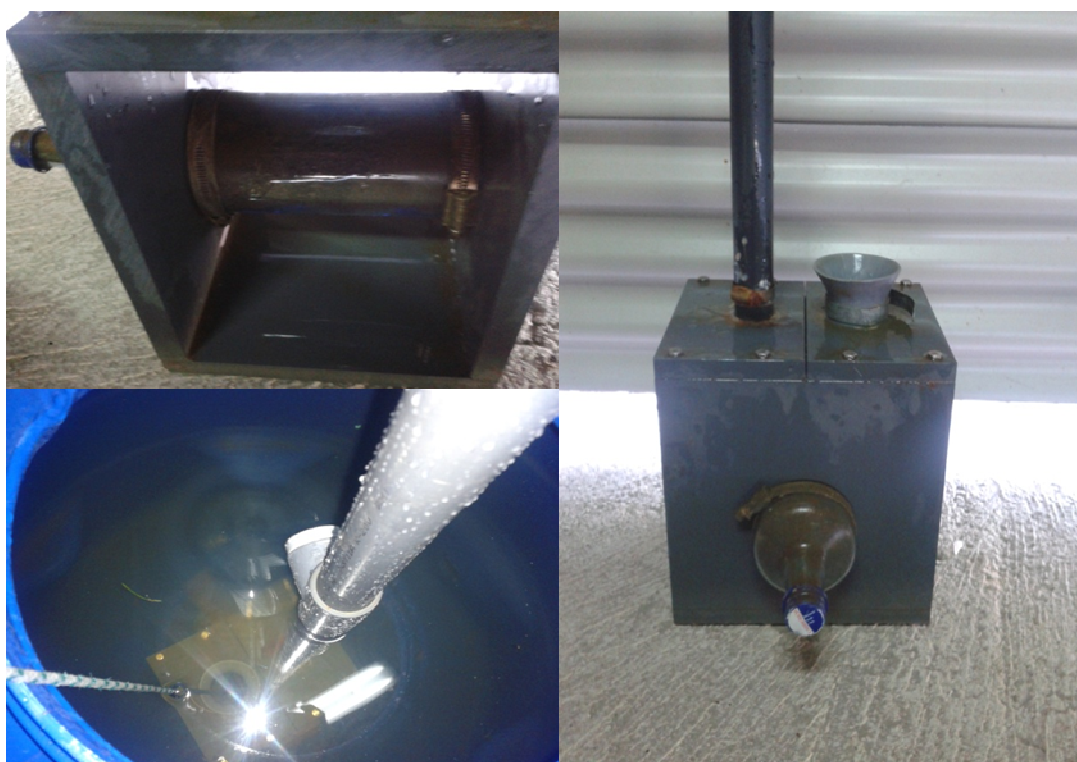


Figura 12. Caja guía

- **Tubería de bajada o de retorno de agua:** Al ser un sistema de retorno de agua, se debió garantizar que el agua elevada regresara al depósito, por lo que, se configuró una tubería de descenso en la instalación. Un

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

extremo de la tubería fue ubicado en la superficie del fondo del barreño acumulador, donde iba a parar el agua extraída, mientras que el otro extremo se redirigió al depósito, por medio de la configuración de varios codos. En el extremo de acceso al depósito se incorporó un caudalímetro con el objetivo de conocer el volumen de agua extraído para cada prueba.



Figura 13. Tubería de bajada

- **Cuerda:** Se instaló una cuerda de nylon puesto que, su coeficiente de elasticidad se consideró el ideal para esta clase de proyectos. En la cuerda se dispusieron los pistones ubicados a una distancia de 1 metro. Para evitar el movimiento de los pistones y conservar la distancia fue necesario realizar una serie de nudos. Además, la cuerda de mecate se autoenlazó, por medio de unos enganches y unos nudos.



Figura 14. Nudo autoenlazado de cuerda (izquierda) y nudos para la fijación de pistones (derecha)

En el Anexo I. *Parámetros representativos de la bomba de mecate* se muestran las dimensiones de cada elemento que se menciona en este apartado.



2.2. MOTORIZACIÓN DE BOMBA DE MECATE

En los siguientes apartados, se explicará con mayor detalle el montaje y configuración del motor eléctrico en la bomba de mecate, explicando el ensamblaje realizado y la estructura que se fabricó para el funcionamiento conjunto del sistema.

2.2.1. Componentes motor eléctrico

El motor eléctrico utilizado ya había sido previamente adquirido por el compañero Javier Padrón González en el proyecto “Instrumentación, adquisición de datos para laboratorio multidisciplinar y motorización de bomba manual de mecate”. En dicho proyecto, se realizó un estudio de diferentes motores que podrían configurarse en la bomba de mecate, siendo la condición principal de elección que pudiera alcanzar las potencias y frecuencias transmitidas por el ser humano. Por lo que, finalmente a parte de cumplir esas características, también se pudo obtener un rango superior de frecuencias y potencias de trabajo que en las demás configuraciones (manual y bici-bomba), pudiendo transmitir durante un tiempo mayor dichas magnitudes de forma constante.

Por lo tanto, se estudió la frecuencia y potencia que dicho motor podía suministrar a la bomba de mecate, debiéndose encontrar:

- *Frecuencia:* La frecuencia natural a la que se mueve la bomba manual de mecate varía en un rango aproximado entre los 0,7 Hz y los 1,3 Hz.
- *Potencia:* La potencia desarrollada varía entre los 20-100 W, dependiendo de la condición física de la persona.
 - 20 W para un niño
 - 50 W para una persona adulta normal
 - 100 W para picos de potencia de persona adulta

En definitiva, el objetivo inicial que se quiso lograr con el montaje e instalación de un motor para la bomba manual de mecate, fue poder caracterizar y simular el comportamiento de una persona extrayendo agua sin variar la potencia, debido a que no existe cansancio físico. Aún así, este objetivo ha crecido al poder disponer de una configuración que permite comprender con mayor exactitud el funcionamiento de la instalación, pues permitió obtener potencias y frecuencias menores y mayores que las obtenidas con el sistema manual de mecate. Todos estos estudios ayudaron a caracterizar más fielmente la bomba, permitiendo que el sistema avanzara alcanzando mayores rendimientos.

El motor utilizado fue un motor eléctrico, destinado a convertir una bicicleta estándar en eléctrica. Se adquirió un Kit en el que venía una serie de elementos:

- **Motor eléctrico:** El motor fue de 36V 350w brushless (sin escobillas) de alto rendimiento, con un peso de 3 kg. Al motor eléctrico se le incorporó un engranaje planetario para adaptar la velocidad a la bomba de mecate, formando el motor y el engranaje planetario un cuerpo compacto.

En el *Anexo II. Hoja de características del motor eléctrico* se muestran las características más representativas del motor.



Figura 15. Motor de bicicleta, sin engranaje planetario (izquierda) y con engranaje planetario (derecha)

- Controlador:** Es el centro de control del sistema, se encarga de captar las señales enviadas por el sensor de pedaleo (PAS) o el acelerador, en este caso se envió la señal desde el acelerador, trasladándose de esa forma la potencia necesaria al motor. El controlador utilizado fue un microprocesador de 12 A, el cual administraba un voltaje de 36 V.



Figura 16. Controlador

- Acelerador:** El acelerador utilizado fue de puño o de “gatillo”. Su función fue la de enviar la señal al controlador para que activara el motor, además según la posición, el motor entregaría una potencia distinta al eje de transmisión. El acelerador disponía de un control

denominado “velocidad de crucero”, el cual podía fijar constante la velocidad de giro del eje. También, se pudo encontrar un display para el control de la batería, midiendo en cada instante el estado de la carga.



Figura 17. Acelerador de puño

El Kit también disponía de otros elementos que no se utilizaron durante la toma de pruebas, pero se van a definir ya que en un futuro el kit puede ser montado sobre una bici-bomba de mecate, pudiendo ayudarse durante la extracción de agua por dos métodos:

- **Manetas de freno con corte de señal:** Fue un elemento de seguridad para poder cortar la señal del acelerador al motor. Por lo que, se encarga de cortar la señal del motor tan pronto se presionan los frenos, impidiendo, que se siga acelerando el motor durante una emergencia, por ejemplo.



Figura 18. Manetas de freno

- **Sensor de pedaleo PAS:** En el caso del montaje del motor en la bicicleta, este elemento se instala en el eje pedalier, para así detectar el pedaleo del usuario y enviar una señal al controlador que provoque la activación del motor.



Figura 19. Sensor de pedaleo

Para la alimentación del motor fue necesario disponer de baterías que aportaran 36 V. En este caso, para la realización de las pruebas, se dispuso de un conjunto de baterías que proporcionaron una gran autonomía: 3 baterías de plomo de 0,7 Ah y 3 baterías de plomo de 0,9 Ah.

La intensidad se eligió debido a factores como fueron las pruebas que se iban a llevar a cabo en la instalación, ya que éstas nunca iban a pasar de los valores definidos de 7 y 9 A. Puesto que, la máxima corriente que se introdujo en el motor fue de 3,5 A, siendo ésta suficiente para los objetivos de caracterización de la bomba de mecate que se plantearon conseguir. Estas baterías fueron colocadas en serie aportando de esta forma, el voltaje necesario al motor eléctrico, pudiéndose así realizar las pruebas pertinentes.

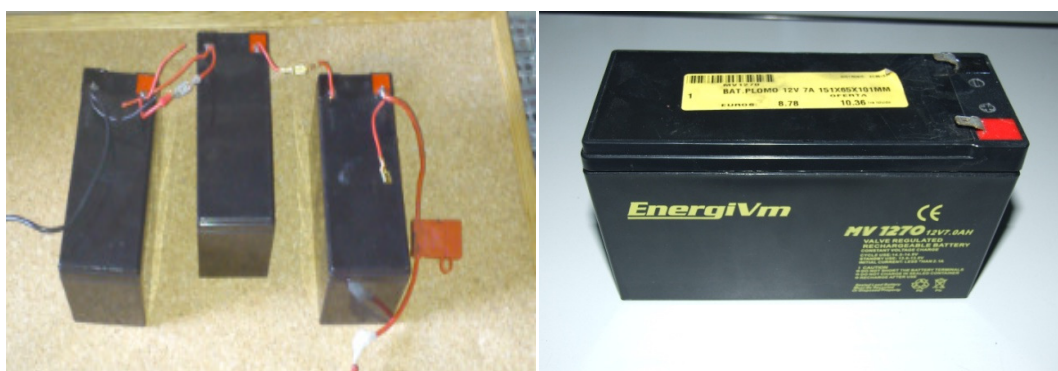


Figura 20. Baterías

2.2.2. Instalación para la motorización de la bomba de mecate

Para llevar a cabo la motorización de la bomba de mecate fue necesario realizar una estructura para el soporte y sujeción del motor.

En un primer lugar, se utilizaron cuatro perfiles de acero de sección hueca cuadrada, con un espesor de 2 mm. La longitud de éstos fue 250 mm, siendo sus extremos cortados en un ángulo de 45° y soldados con otro perfil, de forma que su unión formó la estructura cuadrada. En la mitad de dos perfiles opuestos, se soldaron unas escuadras de acero, con una altura de 130 mm, las cuales se colocaron verticalmente. En la parte superior a una altura de 105 mm, se practicaron dos taladros de 20 mm, en los cuales se ubicó y soportó el eje del motor eléctrico.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Una vez montada la primera estructura para el soporte del motor se comprobó la poca estabilidad de la misma. En las primeras pruebas realizadas con la bomba de mecate motorizada, la estructura no era capaz de soportar la fuerza del motor, produciéndose movimientos y levantamientos de la misma cuando se transmitía un par elevado. Pero, por el contrario, la estructura fue capaz de sujetar fijamente el motor sin que se produjera el giro del cable a elevadas potencias, hecho fundamental para que no se produjera la rotura del mismo. Por lo que, se tuvo que idear otra configuración, la cual permitiera absorber las vibraciones y aportar mayor estabilidad.

Finalmente se añadieron dos perfiles de gran longitud, los perfiles se colocaron horizontalmente unidos a dos extremos opuestos de la estructura inicial. Estos perfiles se unieron por cuatro escuadras ubicadas en cada esquina del soporte, las escuadras disponían de un taladro en cada uno de sus lados, uno para conectarlo a la estructura soporte y otro para conectarlo al perfil de gran longitud. En la estructura inicial se practicaron dos agujeros pasantes, coincidiendo estos con los agujeros de la escuadra, uniéndose por medio de un tornillo sin fin. Mientras que los perfiles de gran longitud disponían de una zona media corredera, con la cual se unía la escuadra por medio de tornillos, con esta configuración se podía conseguir distintas distancias del motor a la rueda motriz, gracias a que la estructura soporte se podía desplazar por los perfiles. Esto fue fundamental cuando se necesitaba cambiar la relación de transmisión, ya que sólo era necesario desplazar el motor a una distancia tal, en la que la cadena se encontrase tensada.



Figura 21. Uniones de la estructura soporte del motor

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Esta última configuración presentó una estabilidad mayor, no produciéndose movimientos por la fuerza del motor. A pesar de la estabilidad cuando se trabajaba a grandes potencias, se dispusieron de unos contrapesos a cada uno de los lados de los perfiles. A continuación, se muestra una foto donde se aprecia la configuración final del motor:

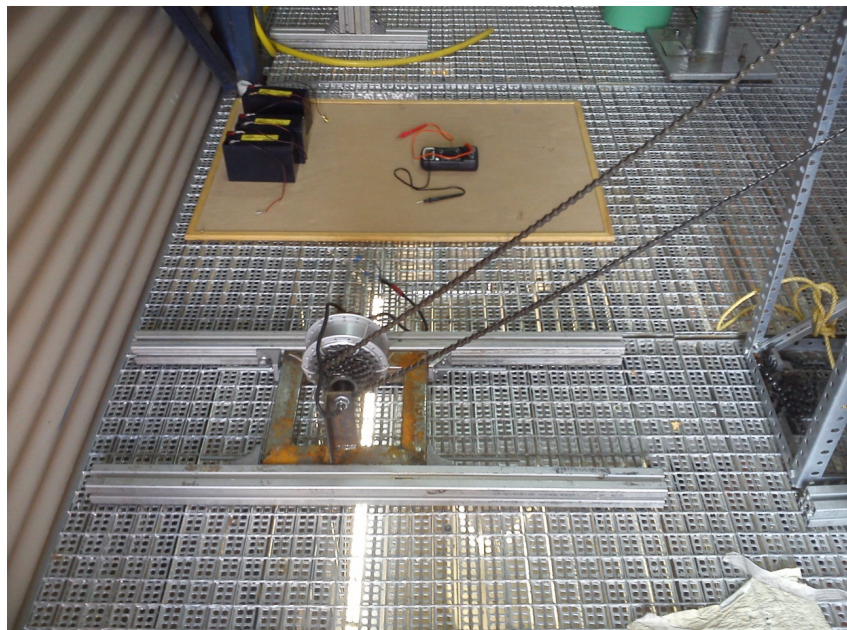


Figura 22. Estructura final del soporte del motor

A parte de la motorización de la bomba de mecate, fue necesario conectar el circuito eléctrico correctamente para que se produjera el movimiento del motor. Para ello, se explican las conexiones del controlador, ya que fue el encargado de enviar las señales de funcionamiento al resto de componentes.

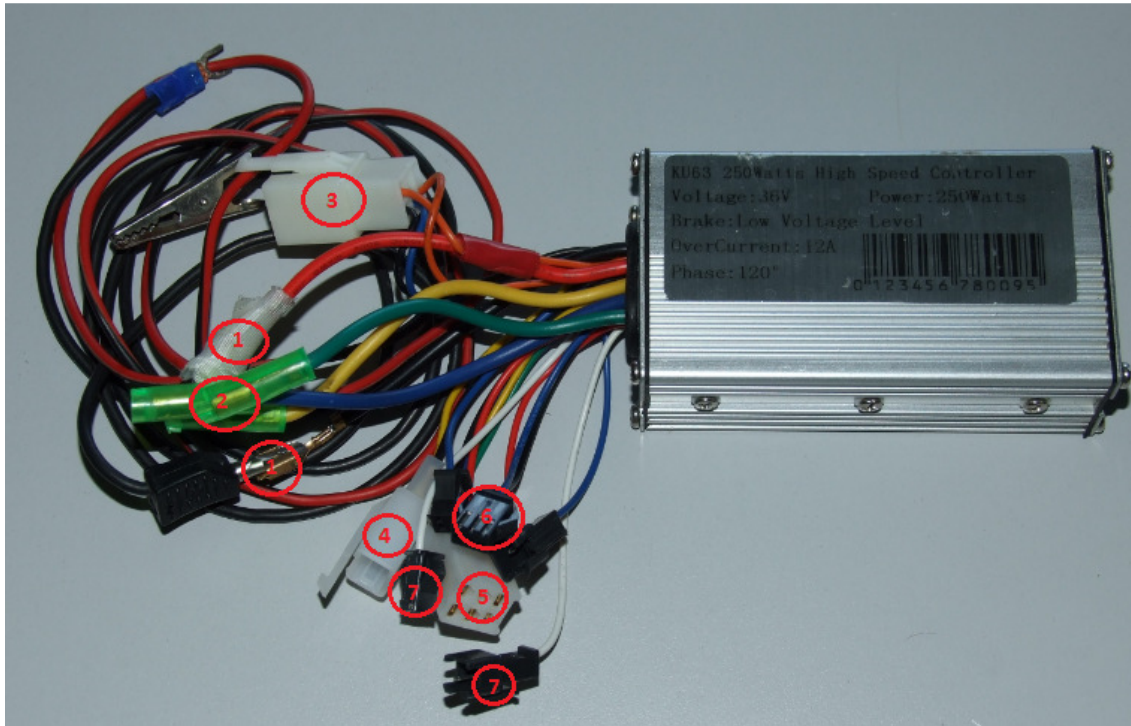


Figura 23. Conexiones del controlador

- Punto 1. Alimentación 36 V baterías (rojo-negro)
- Punto 2. Potencia motor (Verde, amarillo y azul)
- Punto 3. Acelerador (Azul, negro y naranja) e indicador de batería (Rojo)
- Punto 4. Frenos (Amarillo y negro)
- Punto 5. Hall motor (Verde, amarillo, azul, rojo y negro)
- Punto 6. Sensor PAS (Azul y negro)
- Punto 7. Limitador de velocidad (Blanco)

En este caso se realizó el circuito conectando los conectores 1 a las baterías colocadas en serie, las cuales aportaban una potencia al motor de 36 V, los conectores número 2 al motor y la conexión del punto número 3 al acelerador. Finalmente la conexión del circuito eléctrico fue la siguiente:

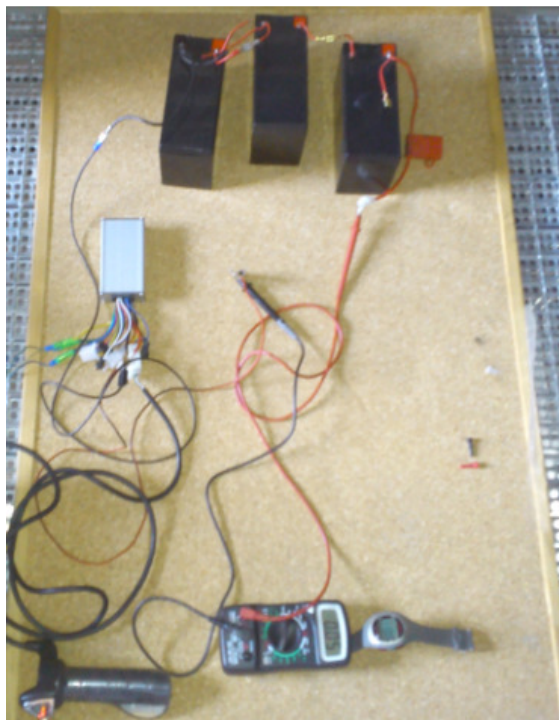


Figura 24. Conexiones del motor eléctrico

2.3. ELEMENTOS DE MEDIDA

En este apartado se describen los aparatos de medida utilizados para recoger los parámetros más representativos tomados durante los ensayos, con el objetivo de caracterizar y llevar a cabo el modelado de la bomba de mecate.

Las variables a medir fueron: volumen, frecuencia, fuerza, potencia eléctrica, tiempo y distancia. A continuación, se realiza una breve introducción de cada uno de los parámetros, del elemento utilizado para medir el mismo y se definió la configuración del dispositivo en la bomba para poder obtener la medida correspondiente.

- **Volumen:** Durante las medidas fue necesario conocer el volumen de fluido que circulaba por la tubería de descenso y que representaba el volumen de agua bombeado por la bomba de mecate en un tiempo determinado, sin contar las pérdidas de agua obtenidas. Por lo tanto, fue necesario disponer de un dispositivo que informara de la cantidad de material que estaba circulando por la tubería.

Para obtener la lectura del volumen se dispuso de un contador de agua que utilizaba como método de medida componentes mecánicos rotativos, utilizando una turbina que giraba a una velocidad angular en función del fluido, proporcionando para cada decímetro cúbico de agua un pulso eléctrico.

Este sensor se colocó al final de la tubería de descenso, recogiendo en todo momento la cantidad de agua que se desalojaba, medía en metros cúbicos con una precisión de $\pm 0,001 \text{ m}^3$. Se muestra una imagen del contador de agua utilizado:



Figura 25. Contador de volumen

- **Frecuencia:** Fue necesario conocer durante la toma de muestras la velocidad de giro a la cual se movía la rueda motriz de la bomba de mecate durante cada extracción de agua. Conociendo ese valor se podía caracterizar los rangos de frecuencias sobre los que funcionaba el sistema, para ello, se dispuso de dos elementos.

Uno de los elementos fue un tacómetro óptico que podía medir en revoluciones o en radianes las vueltas que realizaba la rueda motriz en un periodo de tiempo determinado. La medición se realizaba por medio de una banda reflectante que se adhería a un lado del radio exterior de la rueda de ciclomotor. Dicho tacómetro funcionaba con el principio de medida de ruptura de haz de luz, el dispositivo estaba constituido por un conjunto emisor-receptor, disponiendo de un dispositivo emisor de un haz de luz que era devuelto por medio de un espejo receptor (banda reflectante), cuando se encontraban alineados a una distancia determinada, produciéndose la contabilización de la medida.

También se utilizó para la medición de las revoluciones una cámara de video, la cual grababa durante el tiempo de duración de la prueba las

revoluciones que tomaba la rueda del ciclomotor, disponiendo con este tipo de aparato de mayor autonomía el usuario, durante la realización de la toma de datos.

- **Fuerza:** La medida de fuerza se llevó a cabo en numerosos ensayos puesto que, por medio de este dato se podía simular diferentes alturas de la instalación. También, fue necesario conocer la fuerza de arranque del sistema, mediante la cual se podía establecer la fuerza que había que vencer para que se produjera el movimiento en la bomba.

La primera medida se conoció por medio de un dinamómetro, el cual se configuró linealmente con un dispositivo de frenado, construyéndose este último por medio de dos tablas de madera, en medio de las cuales se encontraban dos pastillas de goma, como las que se utilizan en los frenos de bicicletas. Las tablas con sus pastillas de freno incorporadas, se disponían dejando en medio de ambas el disco de freno, uniéndose por medio de un tornillo, el cual según su fuerza de apriete generaba una fuerza de frenado.

Para la medición de la fuerza el dinamómetro se fijaba a la estructura de la bomba de mecate, permitiendo de esta forma que el resorte se desplazara según la fuerza de frenado, por lo que, de esta manera la medida de la escala de fuerza que lleva el elemento variaría. El rango de medida del dinamómetro varió desde los 0 kg hasta los 30 kg, teniendo un error de $\pm 0,5$ kg.



Figura 26. Configuración del dinamómetro en la instalación

Para la medición de la segunda medida, es decir, para medir la fuerza de arranque del sistema, se utilizó un dinamómetro digital, que permitió medir la fuerza necesaria para que se produjera el movimiento del sistema, por medio de un cubo al que se le añadía pequeñas cantidades de agua hasta que la manivela iniciaba el movimiento.



Figura 27. Dinamómetro digital

- **Potencia eléctrica:** Durante la toma de medidas se necesitó conocer la potencia que el motor suministraba a la bomba de mecate, por lo que, se midió la corriente que circulaba por las baterías y que era suministrada al motor para que pudiera funcionar.

Esta medida fue realizada por medio de un multímetro digital, el cual se conectó en paralelo con el circuito eléctrico del motor, pudiendo medir la intensidad de corriente que suministraban las tres baterías dispuestas en serie.



Figura 28. Multímetro digital

- **Tiempo:** Para toda la toma de medidas realizada en la instalación fue necesario conocer el tiempo de cada prueba, ya que por medio de este valor, se podía llegar a calcular el caudal que bombeaba la instalación, las revoluciones por minuto de la rueda motriz, etc.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

El tiempo se calculó por medio de un cronómetro digital, el cual aportaba información de centésimas de segundo.

- **Distancia:** En algunas de los ensayos realizados fue necesario medir en diversos momentos de tiempo la altura a la que se encontraba el frente de agua en la tubería transparente de ascenso.

Para este tipo de pruebas se dispuso de un metro de medida con precisión de ± 1 mm, el cual fue ubicado en el techo de la instalación siguiendo la tubería de descenso de agua.



Figura 29. Metro de medida

3. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DE LA INSTALACIÓN

Para llevar a cabo experimentalmente el modelado de la bomba de mecate, antes se debió definir una serie de conceptos previos teóricos que ayudaron a la caracterización de dicho sistema. Ya que, en la fase experimental del proyecto se obtuvieron numerosas variables que debían ser comprendidas para el funcionamiento óptimo del sistema. El estudio se centró:

- **Caracterización de la instalación:** Inicialmente se analizó el funcionamiento teórico de la bomba de mecate, teniendo en cuenta el funcionamiento del freno, para la simulación de diferentes alturas, y los valores afectados durante la extracción de agua, el caudal teórico o las distintas fuerzas de rozamiento.
- **Caracterización de la instalación motorizada:** En este bloque se analizaron las variables teóricas afectadas por la configuración de un motor en la bomba de mecate, pudiéndose analizar con mayor precisión las fuerzas de rozamiento y el caudal de pérdidas, así como las relaciones de transmisión.
- **Potencia de trabajo y eficiencia energética:** Por último, se desarrollaron las expresiones teóricas con las que se calculó la potencia de trabajo y la eficiencia del sistema, con las cuales se podrá obtener otros valores de suma importancia.

3.1. ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE FUNCIONAMIENTO

La bomba de mecate ubicada en el laboratorio se encuentra a una altura fija del suelo de 4,2 metros. Pero la variación de dicho parámetro es de relativa importancia en el funcionamiento del sistema, ya que la altura a la que se encuentre el pozo puede variar en innumerables ocasiones en las diferentes instalaciones que existen alrededor del mundo, por lo que, su estudio es fundamental para la extracción de agua. Por tanto, se ha de establecer una formulación que relacione la elongación del muelle del dinamómetro, configurado en el sistema de frenado, con la altura a la que se puede encontrar la instalación.

La obtención de una formulación que relacione ambos parámetros supone poder analizar el comportamiento de la instalación dependiendo de la altura a la que se encuentre (a pesar de realizar las pruebas a una altura real fija), logrando alcanzar mejoras en la instalación según este valor aumente o disminuya.

Para poder simular diferentes alturas, se instaló un sistema de frenado, ya mencionado anteriormente. El disco de freno estaba unido solidariamente al elemento a frenar, la rueda, siendo sometido el disco al rozamiento de las pastillas de freno, por ambas caras. El soporte donde se ubicaron las pastillas fueron dos tablas de madera, que a su vez, se encontraban linealmente unidas al dinamómetro. Por medio de este mecanismo, se pudo relacionar la altura con la fuerza de frenado, obtenida por la unidad de masa marcada en el dinamómetro. Para ello, se debió igualar el par que se ejercía en la rueda para extraer agua y el par que provocaba el freno.

- **Par de la rueda**

El par que ejerce la rueda en la instalación responde a la siguiente ecuación:

$$M_{rueda} = F_{rueda} \cdot R_r \quad (1)$$

El radio de la rueda, ya ha sido calculado con anterioridad por Sergio Ruiz "Instrumentación, adquisición de datos y ensayos de bici-bombas de mecate", para ello consideró todo los elementos que configuraron la polea motriz como un conjunto, el radio de la llanta, el espesor de la goma que se encuentra pegado a la rueda y el radio de la cuerda.

$$R = R_{rueda} + e_{goma} + R_{cuerda} = 194,5 + 1,5 + 2 = 198mm \quad (2)$$

La fuerza que se ejerce en la rueda, es la fuerza que se ejerce sobre la cuerda para extraer el agua. Esta fuerza debe vencer las fuerzas de rozamiento presentes, así como también el peso de la columna de agua que debe ascender.

Las diferentes fuerzas de rozamiento que se pueden encontrar en la instalación son la fuerza de rozamiento de los cojinetes y el eje, provocada por la fuerza que se opone al movimiento de la rueda. La fuerza de rozamiento de la botella y la cuerda, ésta aparece en la parte inferior de la instalación (en el pozo o depósito), en la caja guía cuando pasa la cuerda por la botella. Por último, la fuerza de rozamiento provocada por la tubería y los pistones, aparece en la tubería de ascenso, cuando los pistones están subiendo, rozando levemente con la tubería.

Además, de todas estas fuerzas de rozamiento, también se debe vencer el peso de agua que asciende, en este caso será, el peso de la columna de agua ascendida, el peso de los pistones y el peso de la cuerda.

$$F = P_{agua} + P_{pistones} + P_{cuerda} + Fr_{tubería-pistones} + Fr_{cojinetes-eje} + Fr_{botella-cuerda} \quad (3)$$

Para calcular el peso del agua, se consideró que el agua llenaba toda la tubería. Por lo tanto, se calculó el volumen de la tubería para luego restarle los diferentes espacios que no se encontraban ocupados por agua. Estos espacios fueron los pistones y la cuerda, ambas variaran con la altura, puesto que dependiendo de la altura se tendría un número de pistones diferentes, ya que en todo momento, la distancia entre pistones se consideró constante y de valor 1 metro.

$$P_{agua} = V_{agua} \cdot \rho \cdot g \quad (4)$$

El volumen del agua se calculó en función de la siguiente ecuación:

$$V_{agua} = V_{tubería} - N_p \cdot V_{pistón} - V_{cuerda}$$

$$V_{agua} = \frac{\pi \cdot d_{tub}^2}{4} \cdot h - N_p \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{pist.cil}^2}{4} \cdot h_{pist.cil} + \frac{\pi \cdot r_{pist.con}^2 \cdot h_{pist.con}}{3} \right) - \frac{\pi \cdot d_{cuer}^2}{4} \cdot h \quad (5)$$

Para realizar una primera relación y aproximación teórica de la altura frente a la masa indicada por el dinamómetro se consideró que la fuerza de rozamiento del sistema era despreciable, ya que se consideró que el peso de la columna de agua sería mucho mayor que las restantes fuerzas de rozamiento. También, se consideró despreciable el peso de los pistones y de la cuerda, por lo que, se anulo de la ecuación puesto que, el peso

que asciende es igual al peso que desciende. La fuerza necesaria a realizar para la extracción de agua fue la siguiente:

$$F = \left(\frac{\pi \cdot d_{tub}^2}{4} \cdot h - N_p \left(\frac{\pi \cdot d_{pist.cil}^2}{4} \cdot h_{pist.cil} + \frac{\pi \cdot r_{pist.con}^2 \cdot h_{pist.con}}{3} \right) - \frac{\pi \cdot d_{cuer}^2}{4} \cdot h \right) \cdot \rho \cdot g \quad (6)$$

Siendo la expresión del par la que se muestra a continuación:

$$M = \left[\left(\frac{\pi \cdot d_{tub}^2}{4} \cdot h - N_p \left(\frac{\pi \cdot d_{pist.cil}^2}{4} \cdot h_{pist.cil} + \frac{\pi \cdot r_{pist.con}^2 \cdot h_{pist.con}}{3} \right) - \frac{\pi \cdot d_{cuer}^2}{4} \cdot h \right) \cdot \rho \cdot g \right] \cdot R \quad (7)$$

Sustituyendo los diferentes valores la expresión numérica del par en función de la altura fue:

$$M = \left[(5,81069 \cdot 10^{-4} h - 3,952 \cdot 10^{-6} N_p - 1,25664 \cdot 10^{-5} h) 999,19 \cdot 9,8 \right] 0,198 \quad (8)$$

- **Par del freno**

El par que ejerce el freno en la instalación viene provocado por la fuerza de rozamiento que ha de ser vencida para poder mover la rueda motriz, dicho esfuerzo viene determinado por el rozamiento de las zapatas con el disco de freno y que se recoge en el dinamómetro instalado, pudiendo simular el esfuerzo requerido para extraer agua desde diferentes profundidades, su expresión teórica fue la siguiente:

$$M_{freno} = m_{din} \cdot g \cdot R_{discofreno} \quad (9)$$

La expresión numérica en función de la masa que se obtenía en el dinamómetro fue:

$$M_{freno} = m \cdot 9,80,06 = 0,588 \cdot m \quad (10)$$

- **Relación entre el par de la rueda y el par del freno**

Relacionando ambas expresiones se obtiene:

$$M_{rueda} = M_{freno} \quad (11)$$

$$\left[\left(\frac{\pi \cdot d_{tub}^2}{4} \cdot h - N_p \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{pist.cil}^2}{4} \cdot h_{pist.cil} + \frac{\pi \cdot r_{pist.con}^2}{3} \cdot h_{pist.con} \right) - \frac{\pi \cdot d_{cuer}^2}{4} \cdot h \right) \cdot \rho \cdot g \right] \cdot R_r = m_{din} \cdot g \cdot R_{discofreno} \quad (12)$$

La expresión numérica fue:

$$\left[\left(5,810710^{-4} h - N_p 3,952710^{-6} - 1,256610^{-5} h \right) 9792,062 \right] 0,198 = m_{din} \cdot 9,80,06 \quad (13)$$

En dicha expresión aparecen tres variables la altura, el número de pistones y la masa del dinamómetro. La altura y el número de pistones están directamente relacionados puesto que, según el valor de la altura se obtiene un número de pistones diferentes circulando por la tubería de ascenso, teniendo en cuenta que la separación que debe existir entre cada pistón es constante e igual a 1 metro. Por lo que, sólo quedaría la masa del dinamómetro como incógnita, pero ésta se puede obtener gracias al freno instalado, el cual aporta el valor correspondiente según la elongación que se produzca en el muelle en cada momento.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Dando valores a la masa del dinamómetro se pudo obtener una primera aproximación de la altura simulada en la instalación de la bomba, observándose los datos teóricos en el *Anexo III. Altura de la instalación*.

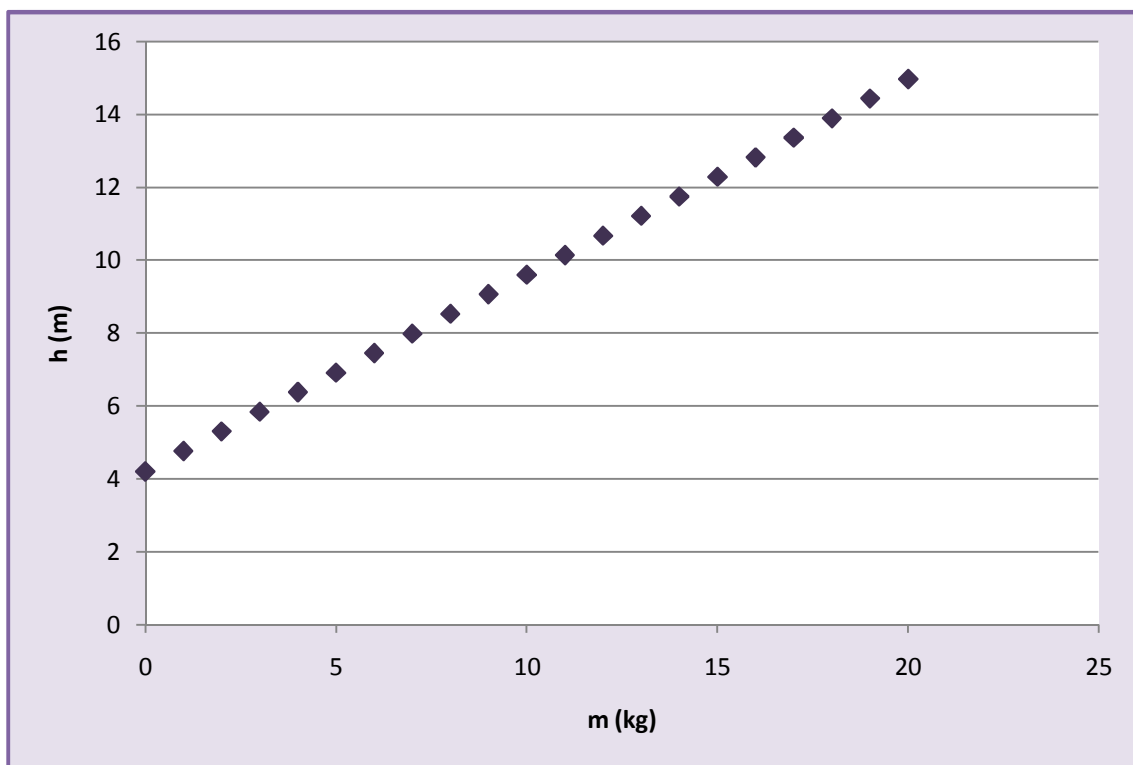


Figura 30. Relación teórica entre fuerza dinamómetro-altura

3.2. CAUDAL

El caudal ideal de la instalación se consideró al caudal que se obtenía en la instalación sin considerar las pérdidas de agua, dependiendo de la velocidad de subida de los pistones por la tubería de ascenso y el área que ocupaba dicha tubería, considerándose que toda el área de ésta, estaba llena de agua, excepto por la cuerda que se encontraba a lo largo de toda la longitud de la tubería. Ambos parámetros estaban directamente relacionados con el volumen de agua que se podía extraer. Por lo que, el caudal ideal se debió expresar con la siguiente ecuación:

$$Q_{ideal} = v_{SubidaPistón} \cdot (A_{TotalTubería} - A_{cuerda}) \cdot \phi \quad (14)$$

La velocidad de subida de los pistones fue igual:

$$v_{SubidaPistón} = \omega_{rueda} \cdot R_{rueda} \quad (15)$$

Siendo el caudal ideal el siguiente:

$$Q_{ideal} = \omega_{rueda} \cdot R_{rueda} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot (D^2_{InteriorTubería} - D^2_{cuerda}) \right) \cdot \phi \quad (16)$$

En dicho caudal se tuvo en cuenta el coeficiente de corrección ϕ , éste es un término que considera el volumen ocupado por la columna de agua entre dos pistones midiendo el volumen de aire que se encuentra dentro de dicha columna. Según Javier Tobella "Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate" si se tenía un nivel de agua en el depósito superior a 0,5 metros la altura del frente de agua sería siempre igual a 1 metro, que es la distancia entre pistones. Por lo que, la tubería se encontraría totalmente ocupada por

agua ya que, se cumplió esta condición durante todas las pruebas, siendo el volumen de agua en el depósito de 0,85 metros de altura. Siendo el factor de corrección en todo momento próximo a la unidad. La siguiente ecuación recoge los parámetros de los que depende:

$$\phi = \frac{(H_{FA} \cdot A_T - V_{pistón})}{H_P \cdot A_T} \quad (17)$$

Si se sustituyen dichos valores numéricamente el coeficiente de corrección tendería a la unidad, significando que durante las pruebas no existía apenas aire en la tubería, sólo unas insignificantes burbujas alrededor de los pistones:

$$\phi = \frac{(1,5,68510^{-6} - 3,95310^{-6})}{1,5,68510^{-6}} = 0,993 \quad (18)$$

Pero el caudal ideal en este caso no fue igual que el caudal teórico, ya que para el cálculo de dicho caudal se tenía que tener en cuenta las pérdidas de volumen que se producía en la instalación para cada velocidad de giro de la polea motriz. El caudal teórico o útil debía ser similar al caudal experimental obtenido en la instalación durante la fase de pruebas y ensayos.

$$Q_{teórico} = Q_{ideal} - Q_{pérdidas} \quad (19)$$

Las pérdidas del caudal se obtenían en varios sitios, las más importantes se producían a lo largo de la tubería de ascenso, ya que entre los pistones y la tubería existía una cierta holgura. Otras pérdidas podían producirse a la salida de la tubería de ascenso, debido al arrastre de la cuerda, siendo éstas consideradas mínimas, ya que, la tubería ensanchaba su diámetro en la salida.

3.3. RELACIÓN DE TRANSMISIÓN

Para la configuración del motor con la bomba de mecate, se tuvo que tener especial consideración del sistema de transmisión. La transmisión se realizó por cadena, por lo que, en el sistema se admitían unos pares elevados y unas velocidades moderadas.

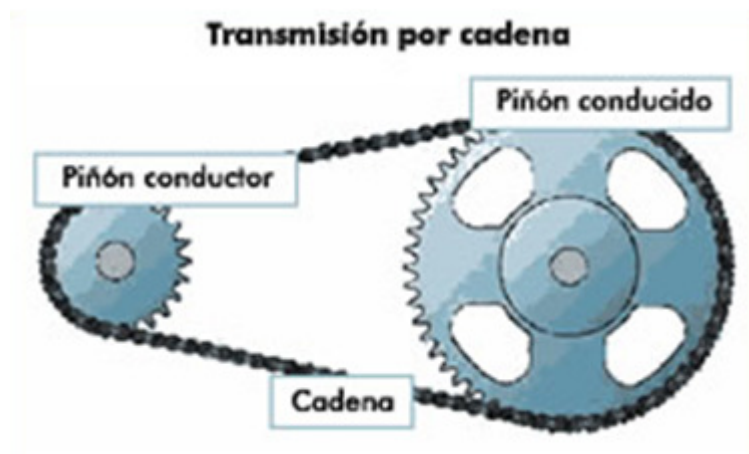


Figura 31. Transmisión por cadena que representa la instalación del motor eléctrico en bomba de mecate

En este caso, el motor representó el eje conductor, transmitiendo la potencia al sistema, mientras que el eje conducido fue el plato que se encontraba girando solidariamente con la rueda de motocicleta o polea motriz de la bomba de mecate.

El piñón conductor lo formaba un sistema de engranajes planetarios con diferentes diámetros y número de dientes, mientras que el piñón conducido estaba formado por un único engranaje. Al estar formado el eje conductor por distintos engranajes, en el sistema se podía adaptar la velocidad de rotación del eje de entrada variando las relaciones de transmisión:

Piñón conducido	Piñón conductor	Relación de transmisión
48	28	1,714
	24	2,000
	21	2,286
	19	2,526
	17	2,824
	15	3,200
	13	3,692

Tabla 6. Relación de transmisión

A lo largo de la memoria se utilizó en todo momento la reductora 13/48 y 19/48, pudiendo por medio de éstas conseguir mantener la velocidad de salida en un régimen cercano al ideal para el funcionamiento óptimo.

Para poder conocer en todo momento las revoluciones de ambos ejes se pudieron relacionar las siguientes ecuaciones:

$$Z_{motor} \cdot \omega_{motor} = Z_{rueda} \cdot \omega_{rueda} \quad (20)$$

$$d_{engranajemotor} \cdot \omega_{motor} = d_{engranajerueda} \cdot \omega_{rueda} \quad (21)$$

En la primera se muestra la relación que existe entre el número de dientes de los piñones con el giro de los ejes, mientras que la segunda relaciona los diámetros, en lugar del número de dientes.



3.4. POTENCIAS DE TRABAJO

En este apartado se definen las cuatro potencias que aparecían con la configuración motorizada de la bomba de mecate: potencia eléctrica, potencia de trabajo del motor, potencia de transmisión y potencia de trabajo de la bomba de mecate.

En primer lugar, se encuentra la potencia eléctrica. La potencia eléctrica es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo, es decir, es la cantidad de energía absorbida por el motor eléctrico en un tiempo determinado. En el sistema, el motor consume la energía de las baterías, configuradas de tal forma que éstas son capaces de aportar 36 V. La ecuación que refleja la potencia eléctrica se muestra a continuación:

$$W_{eléctrica} = V \cdot I \quad (22)$$

En segundo lugar, está la potencia de trabajo que suministra el motor. El motor absorbe la potencia eléctrica para transformarla en energía mecánica, por lo que, la energía eléctrica es utilizada para obtener un campo electromagnético que hacen que las bobinas del rotor giren sobre su eje, siendo éste la parte móvil del motor que se encarga de transmitir el trabajo a la rueda motriz por medio de una transmisión de cadena. En definitiva, la potencia mecánica o la potencia del motor es la encargada de aplicar la fuerza de giro del sistema exterior en el que se encuentra montado los engranajes planetarios. El eje móvil produce un par motor que es el momento de fuerza que ejerce el motor sobre el eje de transmisión de potencia. La potencia desarrollada por el par motor es proporcional a la velocidad angular del eje de transmisión. La ecuación de la potencia de trabajo del motor fue la siguiente:

$$W_{motor} = T \cdot \omega_{motor} \quad (23)$$

La potencia de trabajo del motor se obtuvo de las características del motor, las cuales se encuentran recogidas en el *Anexo II. Hoja de características del motor eléctrico*.

Posteriormente, se encuentra la potencia de trabajo que se produce en el eje de la polea motriz, y que es fruto del trabajo que trasmite el motor, a través del sistema de engranajes y cadena. El trabajo que se produce en la polea es el encargado de mover la rueda del ciclomotor, permitiendo que los pistones asciendan. Este trabajo no es el mismo que el que se produce en el motor, ya que, existen numerosas pérdidas por el movimiento de arrastre entre las ruedas dentadas y la cadena de transmisión. En definitiva, la potencia generada en la rueda motriz no se puede calcular teóricamente, considerándose en este caso igual a la potencia del trabajo del motor, ya que, las pérdidas en la transmisión se establecieron mínimas.

Por último, se tiene en el sistema la potencia de trabajo útil, siendo ésta la que se ejerce en el sistema para la extracción de agua.

$$W_{\text{útil}} = \rho \cdot g \cdot h \cdot Q_{\text{exp}} \quad (24)$$

3.5. RENDIMIENTOS

En este apartado se analizan todos los rendimientos presentes en la bomba de mecate. Se pueden distinguir varios tipos de rendimiento en la instalación: el rendimiento volumétrico, el rendimiento de fuerzas y el rendimiento de la bomba de mecate.

El rendimiento volumétrico compara el caudal teórico o el caudal que se ha extraído en cada momento, considerando las pérdidas, con el caudal ideal. La ecuación que representa dicho rendimiento es la siguiente:

$$\eta_v = \frac{Q_{teórico}}{w_{rueda} \cdot R_r \cdot A_T} = \frac{w_{rueda} \cdot R_r \cdot A_T \cdot \phi - Q_{pérdidas}}{w_{rueda} \cdot R_r \cdot A_T} \quad (25)$$

El rendimiento mecánico es el que se origina por la fuerza de rozamiento que hay que vencer para el funcionamiento de la bomba de mecate, así como el peso del agua que hay que ascender. Su expresión se muestra a continuación:

$$\eta_F = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot A_T}{\rho \cdot g \cdot h \cdot A_T + F_{rozamiento}} \quad (26)$$

En la relación anterior el rendimiento está en función de la altura a la que se encuentre el pozo y de la fuerza de rozamiento, por lo que, con esta ecuación se podrá obtener si dicha fuerza de rozamiento varía para cada altura o depende en mayor medida de la tensión de la cuerda, como se estableció en el proyecto "*Caracterización de bombas y bicis-bombas de mecate*".

Por último, se define el rendimiento de la bomba de mecate, el cual está marcado por la relación de los anteriores parámetros. Siendo la ecuación del rendimiento:

$$\eta_{bomba} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q_{exp}}{W_{motor - rueda motriz}} = \eta_v \cdot \eta_F \quad (27)$$

La ecuación anterior compara las potencias que se encuentran exclusivamente en la bomba de mecate, comparando la potencia útil que se necesita para extraer una cantidad de agua determinada y la potencia que es suministrada a la polea motriz a través del sistema de transmisión por cadena.

3.6. FUERZA DE ROZAMIENTO

Con las ecuaciones mostradas anteriormente donde se podían obtener los diferentes rendimientos del sistema, también se podía hallar una ecuación teórica para la fuerza de rozamiento.

$$F_{roz} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot A_T}{\eta_F} - \rho \cdot g \cdot h \cdot A_T \quad (28)$$

Sustituyendo el rendimiento:

$$\eta_F = \frac{\eta_b}{\eta_V} = \frac{\frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q_{esp}}{W_{motor-ruedamotriz}}}{\frac{w_{rueda} \cdot R_r \cdot A_T \cdot \phi - Q_{perd}}{w_{rueda} \cdot R_r \cdot A_T}} \quad (29)$$

La ecuación de la fuerza de rozamiento será:

$$F_{roz} = \frac{(\rho \cdot g \cdot h \cdot A_T) \left(\frac{w_{rueda} \cdot R_r \cdot A_T \cdot \phi - Q_{perd}}{w_{rueda} \cdot R_r \cdot A_T} \right)}{\left(\frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q_{exp}}{W_{motor-ruedamotriz}} \right)} - \rho \cdot g \cdot h \cdot A_T \quad (30)$$

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Si se simplifica la anterior ecuación se obtiene:

$$F_{roz} = \frac{W_{motor-ruedamotriz}}{w_{rueda} \cdot R_r} - \rho \cdot g \cdot h \cdot A_T = F - \rho \cdot g \cdot h \cdot A_T \quad (31)$$

Por lo que, la fuerza de rozamiento depende tanto del par que se transmite desde el motor a la polea motriz como de la altura a la que se encuentre la instalación, durante la extracción de agua. Siendo la altura una magnitud muy importante que puede influir enormemente en la fuerza de rozamiento.



4. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA INSTALACIÓN

A lo largo de este capítulo, se muestran todos los resultados numéricos obtenidos durante la toma de datos, tanto con la configuración manual como también con la configuración motorizada de la bomba de mecate. Además, se realiza un análisis exhaustivo de los datos y se procede a la comparación de diversas teorías que han sido extraídas en los proyectos anteriores en esta instalación.

Durante este capítulo se han extraído diversas tablas y gráficas que se encuentran recogidas en los *Anexo VIII. Tablas teóricas* y *Anexo IX. Representaciones gráficas*.



4.1. RANGO DE FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN

En primer lugar, se definió el rango de funcionamiento de la instalación cuando se encontraba configurado el motor en la bomba de mecate, para ello, fue necesario evaluar algunos de los elementos que se utilizaban para la toma de datos, analizando cómo funcionaban en conjunto con el sistema. Ya que, la incorporación de ciertos elementos podían ocasionar o provocar problemas en el funcionamiento del sistema.

Por lo tanto, debido a que cada elemento que se incorporó a la instalación provocaba o proporcionaba una modificación del comportamiento de la instalación, se debió definir un rango de actuación de dichos elementos, que permitiera que el sistema funcionara de forma correcta durante la toma de datos.

Es por ello, que se comprobó que algunos de los dispositivos configurados trabajando en ciertos límites de valores podían producir pandeos o vibraciones en la instalación (freno), pudiendo ocasionar daños en la estructura de la bomba de mecate, así como la extracción de gran cantidad de volumen de agua podía no llegar a ser procesada o desalojada por el conducto de bajada (potencia motor), provocando el desborde de agua en el barreño acumulador (estrechez de diámetro en el caudalímetro). Por lo que, se acotaron algunos parámetros en la bomba de mecate motorizada para que se produjera un funcionamiento estable.

En definitiva, se comprobó el rango de funcionamiento con dos elementos configurados en la bomba de mecate motorizada, como fueron el freno y el motor.

4.1.1. Freno

El freno se incluyó en la instalación, para simular diferentes alturas de profundidad, a las cuales extraer agua. Ya que sino solo se podría obtener un valor predeterminado, por encontrarse la instalación siempre a una altura fija (4,2 metros de longitud de la tubería de ascenso en el momento en el que se introduce el agua hasta que se produce la salida de la misma en la zona superior). Por lo tanto, su utilización es fundamental para poder desentrañar y comprender más extensamente el conjunto del sistema de bomba de arrastre.

El funcionamiento del freno es sencillo, constando de un freno de madera y de un disco de frenado. El disco de frenado se encuentra girando solidario a la rueda y con el mismo giro que posee ésta. El freno se realizó con dos tablas rectangulares de madera, encontrándose en ambas tablas dos pastillas de freno de bicicleta a la misma altura. Las tablas de madera aprisionaban el disco de freno, ya que éstas se encontraban unidas en su zona superior e inferior por medio de tornillos.

Por lo tanto, cuando se producía el funcionamiento de la instalación y la rueda motriz comenzaba a dar vueltas, en el sistema de frenado se producía fuerzas de rozamiento que hacían que las pastillas de freno impidieran el movimiento de giro del disco de freno. Apareciendo una fuerza que provocaba que el sistema de frenado se moviera en dirección vertical, acotándose y midiéndose este movimiento debido a que dicho sistema estaba configurado linealmente a un dinamómetro y un gancho que anclaba todo el sistema a la estructura, dejando fijo el sistema e impidiendo el movimiento del freno, pero si se producía la elongación del muelle aportando ese valor la fuerza de frenado.

Para modificar la elongación del muelle del dinamómetro durante las pruebas y así obtener diferentes valores de frenado, era necesario girar uno de los tornillos, junto con la tuerca, que unían las maderas, de esta forma se aumentaba la presión al disco de freno, aumentando la fuerza de oposición al movimiento de la rueda motriz.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Por tanto, se debió comprobar si la instalación funcionaba igual con diferentes valores de la fuerza que proporcionaba el dinamómetro y cuando se comenzaba a tener problemas para medir la misma.

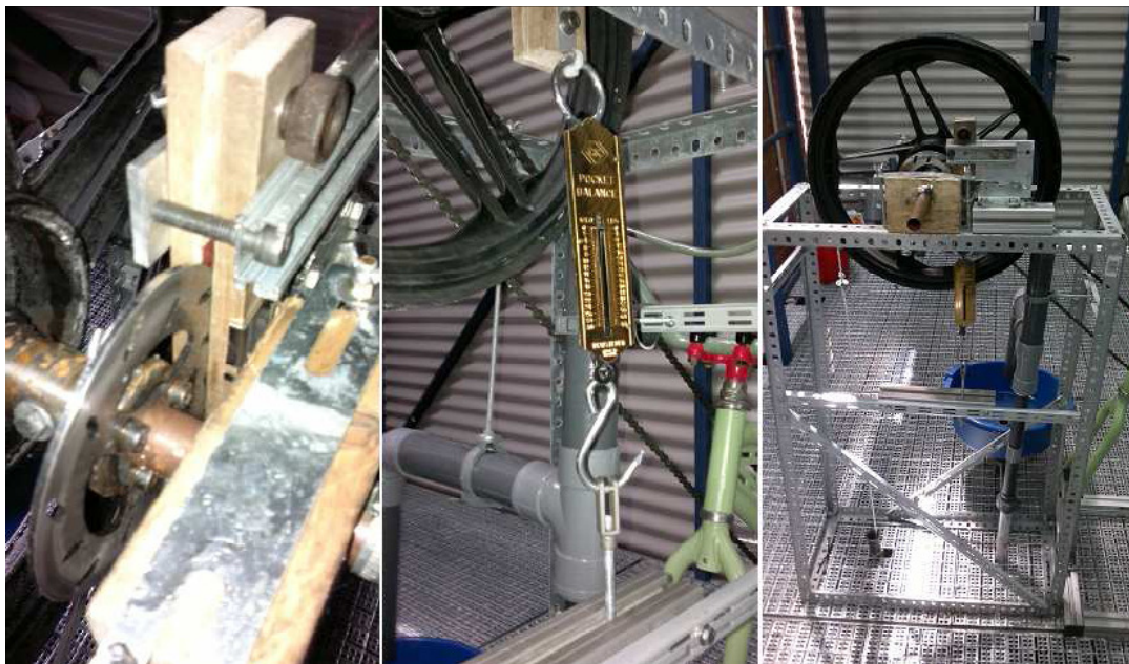


Figura 32. Bomba de mecate con sistema de frenado

Se comenzaron a realizar pruebas para poder obtener el funcionamiento óptimo del freno y como se comportaba la instalación según los valores a los que se encontraba. Gracias a esto se pudo observar como para determinados valores la estructura de la bomba de mecate se volvía inestable. A continuación, se recoge el estudio realizado teniendo en cuenta el análisis desarrollado con la bomba de mecate manual y con la bomba de mecate motorizada.

En primer lugar se realizaron las pruebas con la bomba de mecate manual, accionando la manivela se pudo comprobar cómo actuaba el sistema para diferentes valores marcados en el dinamómetro.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Comprobándose que por debajo de 15 kg no se producía ningún problema en el sistema, funcionando la instalación correctamente. Sin embargo, cuando se estaba trabajando a valores entre 15-20 kg, la estructura de la instalación comenzaba a pandear moderadamente, incrementándose este pandeo cuando alcanzaba valores en el dinamómetro superiores o iguales a 20 kg.

Una solución para poder seguir utilizando el freno a estas alturas, fue reforzar la instalación con barras que impidieran la deformación, aunque finalmente se desechó esta solución puesto que, la bomba de mecate manual era accionada por fuerza humana, siendo imposible para un ser humano realizar la toma de datos para un tiempo determinado con esta configuración de frenado.

Junto con este problema, durante la toma de datos con freno en la configuración manual también se produjo otra contrariedad, ya que, durante el tiempo que duraba los experimentos con la manivela el dinamómetro comenzaba a oscilar entre varios valores.

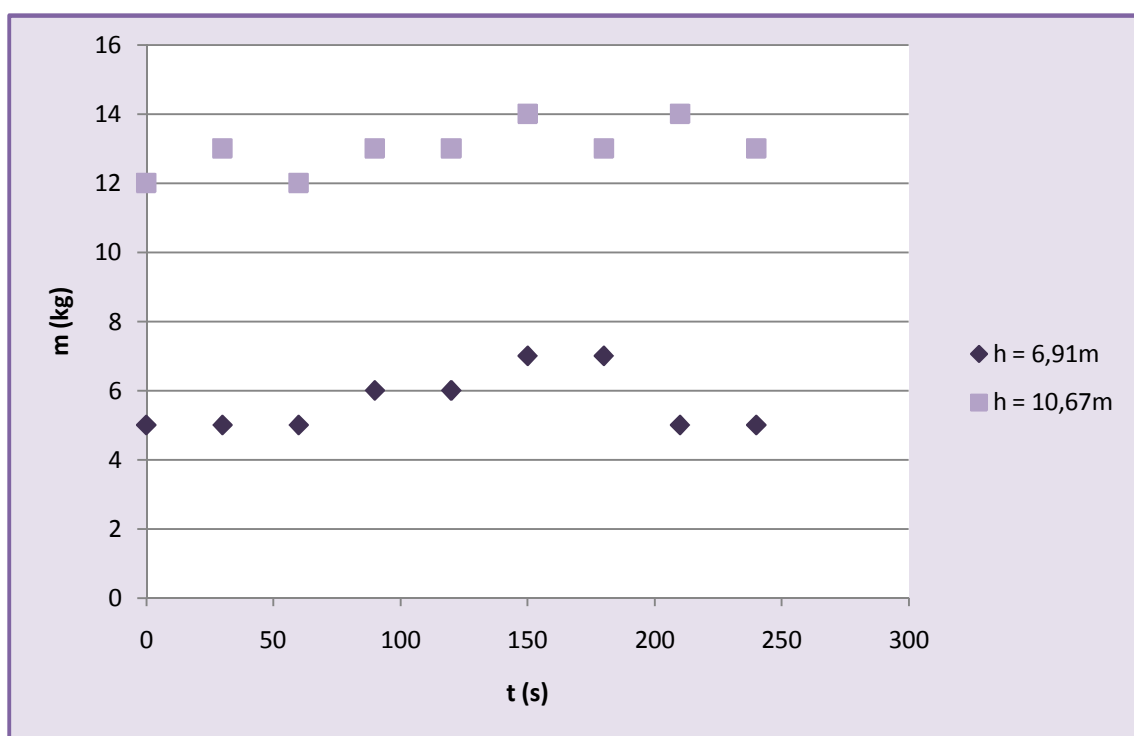


Figura 33. Oscilación que se producía en el freno con la configuración manual de la bomba de mecate

En la gráfica de la Figura 33, se puede comprobar la oscilación que se produce en el freno para dos valores prefijados, una vez que el sistema estaba funcionando con la manivela.

Se ha de remarcar que en los datos tomados con el motor no se producía oscilación en los valores del dinamómetro, llegándose a la conclusión de que este fenómeno se producía debido a que durante el accionamiento manual, en muchas ocasiones era imposible mantener la frecuencia de giro constante para un tiempo determinado, ya que, existía un factor en el ser humano que incidía en este proceso, como era el cansancio.

Como se observa en la Figura 33 la oscilación fue muy pequeña, no conllevando ningún problema para la toma de medida, por lo que, se pudo considerar como un error.

Durante las pruebas realizadas con la configuración de la bomba de mecate motorizada, se pudo comprobar al igual que para la manivela, como cuando la instalación trabajaba con valores de frenado entre 0-15 kg se obtenía un funcionamiento estable, mientras que cuando se sobrepasaban esos valores comenzaba a oscilar la estructura rectangular soporte de la rueda motriz. Es por ello, que para evitar este problema, se reforzó la estructura con unas barras diagonales que se instalaron en la estructura superior de la bomba. Con la solución de refuerzos establecida, se pudieron tomar medidas que estuvieron comprendidas entre 15-20 kg de fuerza de frenado, pero se siguió sin sobrepasar valores mayores de 20 kg por motivos de seguridad.

Finalmente y tras los resultados definidos, se determinó el rango de funcionamiento del freno de 0 a 20 kg, tanto para la configuración de manivela como para la configuración motorizada.

Por último, se recabaron diferentes datos para poder obtener el tiempo de vida útil de las pastillas de freno, variando según los valores del dinamómetro y

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

de la potencia que se suministraba al sistema. Pudiendo destacar que dicho parámetro descendía linealmente según la fuerza de frenado considerada para cada ensayo.

Durante las pruebas se utilizaron cuatro pastillas de freno, dos durante las pruebas que se tomaron con la configuración manual de la bomba de mecate y las otras dos con la configuración motorizada de la bomba.

Sesión	Manivela		Motor	
	Fecha	Tiempo (min)	Fecha	Tiempo (min)
1	05-mar	10	26-jun	5
2	06-mar	3	28-jun	12
3	07-mar	22	02-jul	12
4	14-mar	38	04-jul	16
5	26-mar	36	11-jul	16
6	30-mar	34	16-jul	20
7	12-abr	25	19-jul	13
8	----	----	10-sep	8
9	----	----	08-oct	14
10	----	----	10-oct	4

Tabla 7. Duración de las pastillas de freno

Como se puede comprobar en la Tabla 7, con el motor el desgaste en las pastillas se produce antes, debido a que durante la realización de las pruebas las potencias suministradas al sistema son mayores con el motor que con la manivela, disminuyendo la vida útil de las gomas utilizadas para llevar a cabo las fuerzas de frenado.

4.1.2. Motor

Además de comprobar el rango y duración del freno, también se comprobó el rango de funcionamiento del motor en la instalación de la bomba de mecate puesto que, fue la primera vez que se utilizó este tipo de elemento en dicha instalación.

Por tanto, se varió la potencia eléctrica que el motor consumía y que provocaba un par motor y unas revoluciones determinadas en el eje del motor, transmitiéndose éstas, a su vez, a la rueda motriz de la bomba de mecate, produciéndose la extracción de agua.

Según se fue variando la corriente eléctrica suministrada al motor, se llegó a la conclusión que existía un valor superior determinado, en el cual no se podía hacer funcionar el motor, ya que en la bomba de mecate se producía el desbordamiento de agua en el barreño acumulador, es decir, el sistema extraía mayor cantidad de agua de la que era capaz de desalojar por la tubería de descenso.

Esta circunstancia se debió a la estrechez del caudalímetro, ubicado a la salida de la tubería de descenso de agua, ya que, siendo de un diámetro inferior al conducto de bajada de agua, por lo que, no era capaz de drenar toda la cantidad de agua ascendente produciéndose que el barreño, colocado en la parte superior de 15 litros, rebosara.

En definitiva, fue necesario definir un rango de actuación del motor, acotando los valores de potencia eléctrica superiormente. El valor límite inferior de la potencia eléctrica para la extracción de agua debió ser mayor de 20 W, ya que a partir de ese valor se comenzaba a obtener agua por la tubería de ascenso, siendo el caudal de pérdidas menor que el caudal ideal. Mientras que, el límite superior no debió ser mayor de 117 W para una relación de transmisión de 3/48 y de 108 W para una relación de transmisión de 19/48, a una altura de 4,2 metros.



4.2. CAUDAL

El caudal extraído es un parámetro de gran importancia en el sistema puesto que, todas las mejoras y estudios realizados se llevaron a cabo con el objetivo de aumentar este valor. En anteriores estudios se pudo comprobar cómo éste disminuía a mayor altura, observando su variación.

Con el estudio realizado se amplía esta información, no sólo comparando a diferentes alturas, sino también analizando el mismo para distintos valores de funcionamiento de la instalación, frecuencia de giro, etc. Para el estudio del caudal se realizaron diferente toma de medidas en varias configuraciones.

Por lo que, en primer lugar se realizó una toma de medidas en la que la altura permanecía constante, siendo ésta igual a la que se encuentra en la instalación (4,2 metros) suministrando al sistema potencia a frecuencia constante durante cada prueba, pero variándose para cada repetición de ensayo esta última con el fin de observar el comportamiento del resto de parámetros (caudal de extracción, caudal de pérdidas, etc.). Este experimento se realizó con la configuración de bomba de mecate manual y bomba de mecate motorizada.

En segundo lugar, se realizó una toma de medidas variando la altura y la potencia suministrada al sistema, manteniendo durante el ensayo la frecuencia constante. Este experimento sólo se realizó con la configuración motorizada puesto que, era muy difícil mantener la frecuencia constante, con la bomba de mecate manual, ya que ésta era de accionamiento humano, por lo que, se incidía en numerosos errores, al tener que vencer, durante un período de tiempo determinado, grandes fuerzas de rozamiento.

En definitiva, las medidas realizadas fueron a frecuencia constante puesto que, resultaron más fidedignas y se pudieron analizar valores más exactos. También hay que destacar que no sólo se realizó este experimento en dos configuraciones diferentes para el estudio del caudal (manual y motorizada),

sino que también se pudo comprobar que las medidas realizadas con el motor eléctrico estaban guardando una corrección lógica al ser realizadas con dos relaciones de transmisión (13/48 y 19/48).

4.2.1. Toma de medidas sin sistema de frenado

Se comenzó a realizar la toma de medidas justo cuando comenzaba a salir agua de la tubería al barreño acumulador, iniciándose desde ese preciso instante un contador que finalizaba a los 4 minutos, marcando con ello la finalización del ensayo. Por lo que, se realizaron varias tomas de medida suministrando en cada una de ellas diferentes potencias a la bomba de mecate, manteniendo durante toda una prueba la frecuencia constante.

Esta toma de datos se realizó con una altura fija (4,2 m) puesto que, interesaba comprender el comportamiento y relación entre la velocidad de giro de la rueda motriz y el caudal extraído. Por tanto, los valores que se estudiaron y que se obtuvieron, fueron el caudal extraído y la frecuencia a la que giraba la polea motriz de la bomba de mecate para diferentes potencias de transmisión.

❖ *Medidas bomba de mecate manual*

Para mantener la frecuencia constante con la configuración manual fue necesario disponer de un metrónomo, el cual marcaba los tiempos, pudiendo así, lograr el mismo número de repeticiones de giro de la rueda motriz durante un tiempo determinado, finalizando la prueba tras pasar los cuatro minutos establecidos. Resumiendo el procedimiento que se siguió fue:

1. El usuario comenzaba a girar la manivela para poder extraer agua, produciéndose la ascensión de la cuerda y los pistones, siendo los responsables del levantamiento de la columna de agua.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

2. El usuario mantenía la misma velocidad de giro durante toda la prueba, siendo ésta marcada por un metrónomo.
3. Cuando se producía la salida del agua por la tubería de descarga se empezaba a contabilizar el tiempo (cuatro minutos) y se comenzaba a medir las revoluciones de la rueda motriz (mediante la grabación de videos o por medio del tacómetro óptico para asegurar que la prueba se realizaba correctamente siguiendo la frecuencia marcada).
4. Tras mantener la misma velocidad de giro en la manivela, durante cuatro minutos se finalizaba el ensayo.
5. Al finalizar la prueba se obtenía (mediante el caudalímetro) el volumen de agua que la bomba de mecate pudo extraer durante los cuatro minutos.

Las medidas obtenidas con esta configuración se pueden observar en el *Anexo IV.B. Datos medición frecuencia constante en bomba de mecate manual sin utilización del sistema de frenado.*

Los datos obtenidos fueron realizados por diferentes personas con distinta configuración física (A y B), aun así esto no tendrá especial interés puesto que, se trabajaron con frecuencias fácilmente alcanzables para ambos usuarios, por lo que, los datos fueron prácticamente iguales.

En esta toma de muestras se obtuvo la gráfica donde se pudo apreciar como variaba el caudal extraído por la bomba de mecate respecto a la frecuencia, encontrándose sus resultados en el *Anexo VIII.A. Caudal extraído e ideal:*

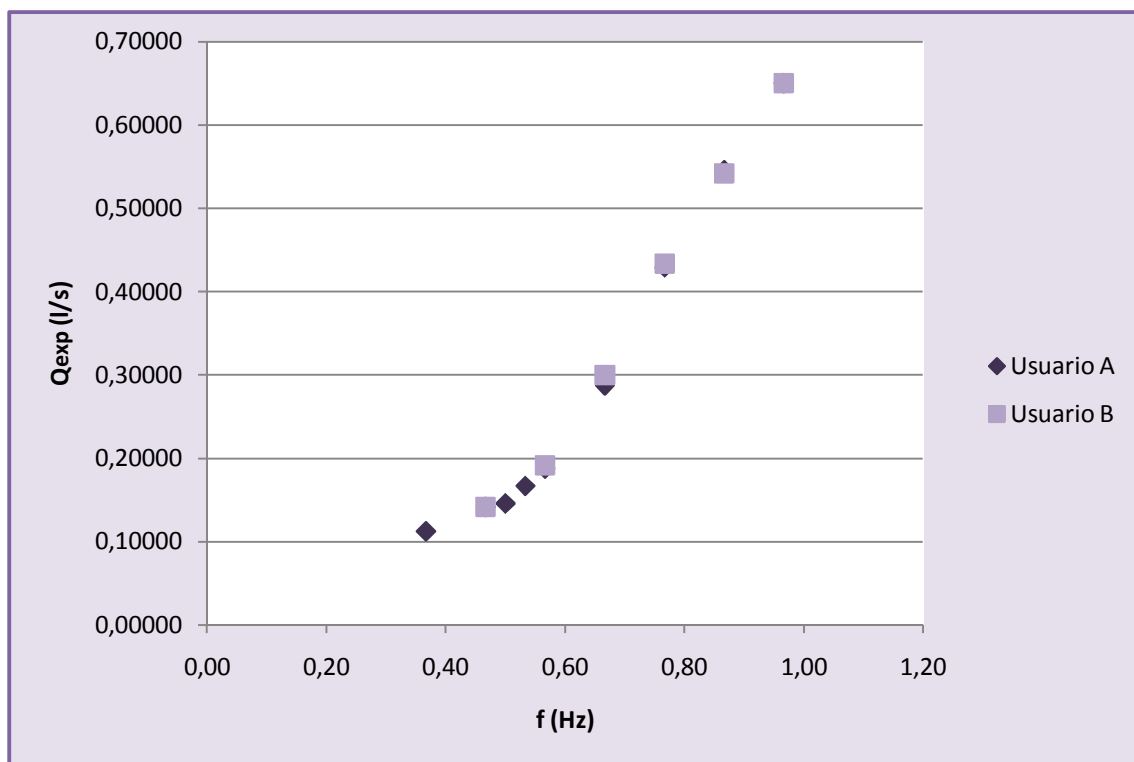


Figura 34. Caudal experimental frente a frecuencia en bomba de mecate manual

En la Figura 34 se muestra como experimentalmente el caudal extraído es superior conforme aumenta la frecuencia, es decir, conforme se aumenta el número de revoluciones de la rueda motriz en el tiempo que dura la prueba o experimento.

❖ *Medidas bomba de mecate motorizada*

Se realizaron las mismas medidas, con el mismo procedimiento de toma de medidas anterior, sólo que esta vez se utilizó el motor para aportar la potencia constante a la bomba de mecate. Resumiendo la toma de datos consistió en la realización de los siguientes pasos:

1. El motor producía potencia que era suministrada a la rueda motriz, para que se produjera el giro, manteniéndose la potencia constante durante el ensayo.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

2. La rueda motriz giraba produciéndose el levantamiento de la columna de agua por la tubería de ascenso.
3. Cuando comenzaba a salir agua por la tubería de descarga se empezaba a contabilizar el tiempo y se empezaba a medir las revoluciones de la rueda motriz (mediante la grabación de videos o por medio del tacómetro óptico).
4. Tras mantener la misma potencia de transmisión del motor a la rueda durante cuatro minutos se finalizaba la transmisión de potencia, finalizándose el ensayo.
5. Al finalizar la prueba se obtenía (mediante el caudalímetro) el volumen de agua que la bomba de mecate pudo extraer durante los cuatro minutos, al igual que el número de revoluciones de la rueda motriz.

Para poder obtener durante esta toma de medidas la frecuencia constante, sólo era necesario que el acelerador se mantuviera en la misma posición durante la duración del experimento. Si se quería obtener diferentes frecuencias sólo era necesario variar la posición del gatillo del acelerador. En el *Anexo VI.A. Datos medición bomba de mecate motorizada sin utilización del sistema de frenado* aparecen los datos que se recogieron durante este ensayo.

En esta toma de muestras se obtuvo la gráfica donde se pudo apreciar como variaba el caudal extraído por la bomba de mecate respecto a la frecuencia, encontrándose sus resultados en el *Anexo VIII.A. Caudal extraído e ideal*:

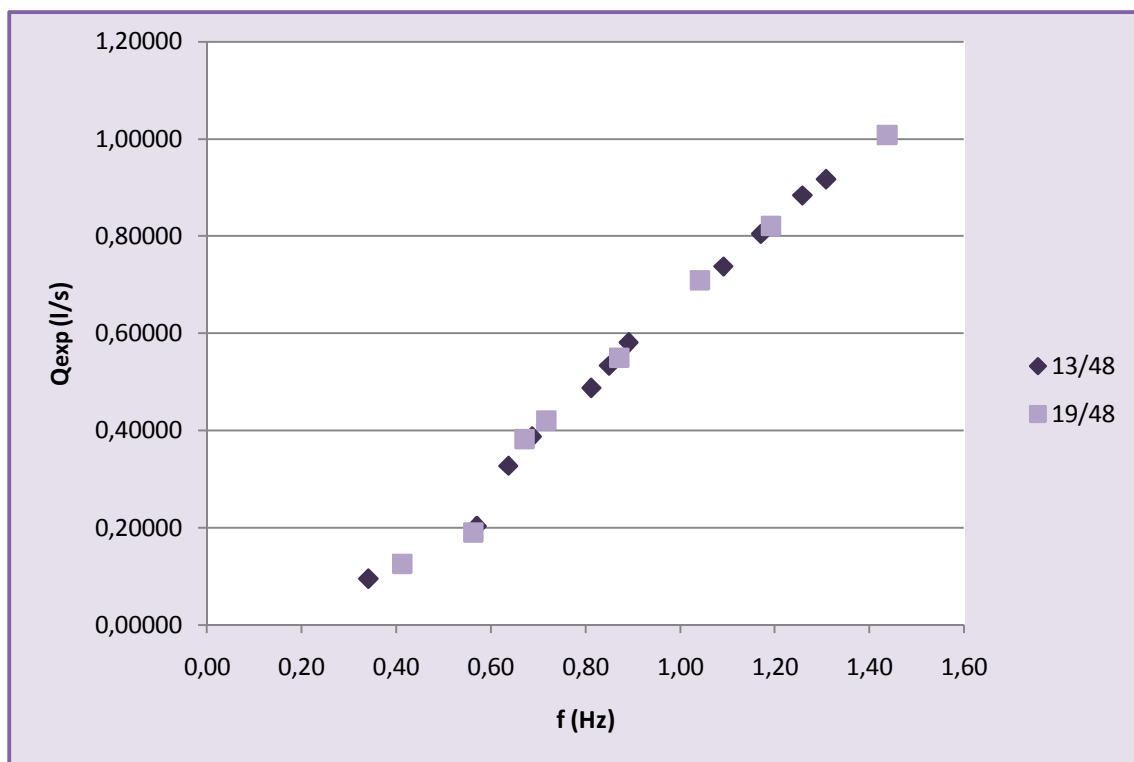


Figura 35. Caudal experimental frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada

En la Figura 35 se ha obtenido un rango de valores mayor que con la configuración de la bomba de mecate manual, pudiendo observarse como la frecuencia va aumentando proporcionalmente.

4.2.2. Toma de medidas con sistema de frenado

En este apartado se tomaron las medidas con el mismo procedimiento que las realizadas anteriormente, sólo que en este caso se utilizó el sistema de frenado obteniéndose una unidad de masa definida por el dinamómetro configurado en la instalación, produciéndose en las medidas tomadas fuerzas de frenado que impedían el giro de la rueda motriz, por lo que, se producía la reducción del caudal extraído. La toma de medidas se realizó considerando los siguientes parámetros:

Sistema de transmisión	Potencia eléctrica (W)	Altura (m)
13/48	63	4,2/6,4/8,5/10,7/12,8
	90	4,2/6,4/8,5/10,7/12,8
	117	6,4/8,5/10,7/12,8
19/48	63	4,2/6,4/8,5/10,7/12,8
	90	4,2/6,4/8,5/10,7/12,8
	117	6,4/8,5/10,7/12,8

Tabla 8. Parámetros considerados durante la toma de medidas con sistema de frenado

A continuación, se observan diferentes gráficas donde se representa el caudal frente a la frecuencia y la altura, según todas las situaciones descritas anteriormente:

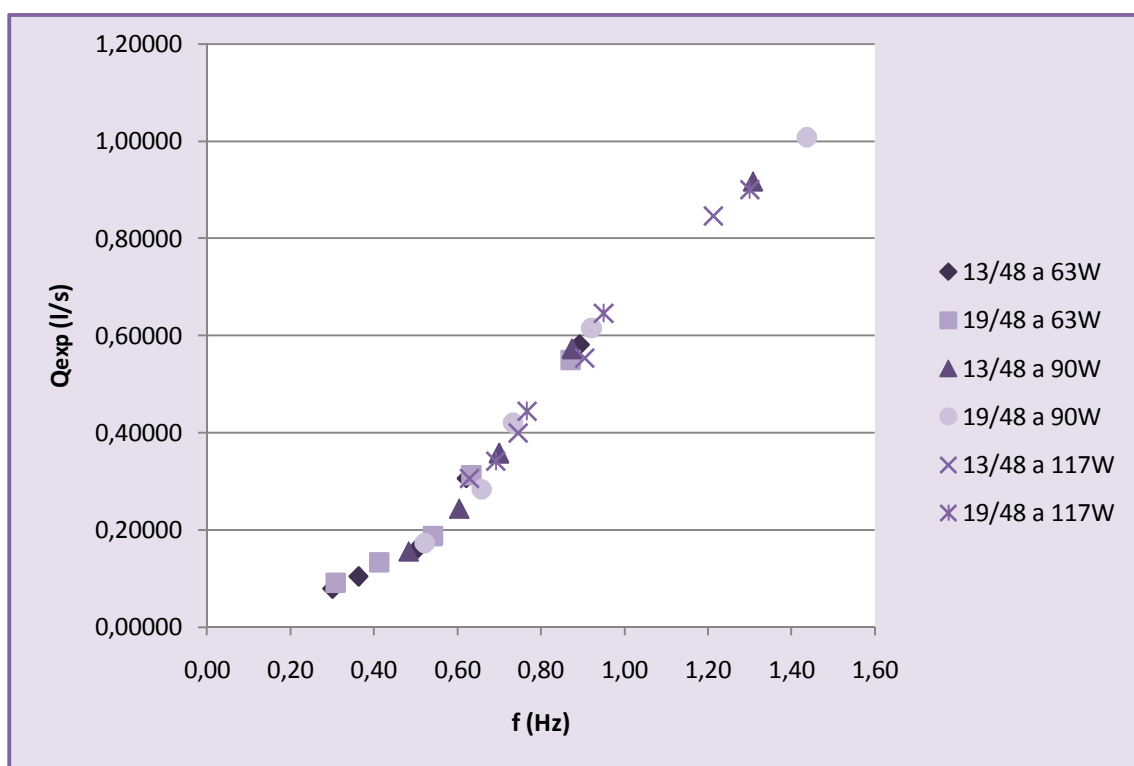


Figura 36. Caudal experimental frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada (diferentes alturas)

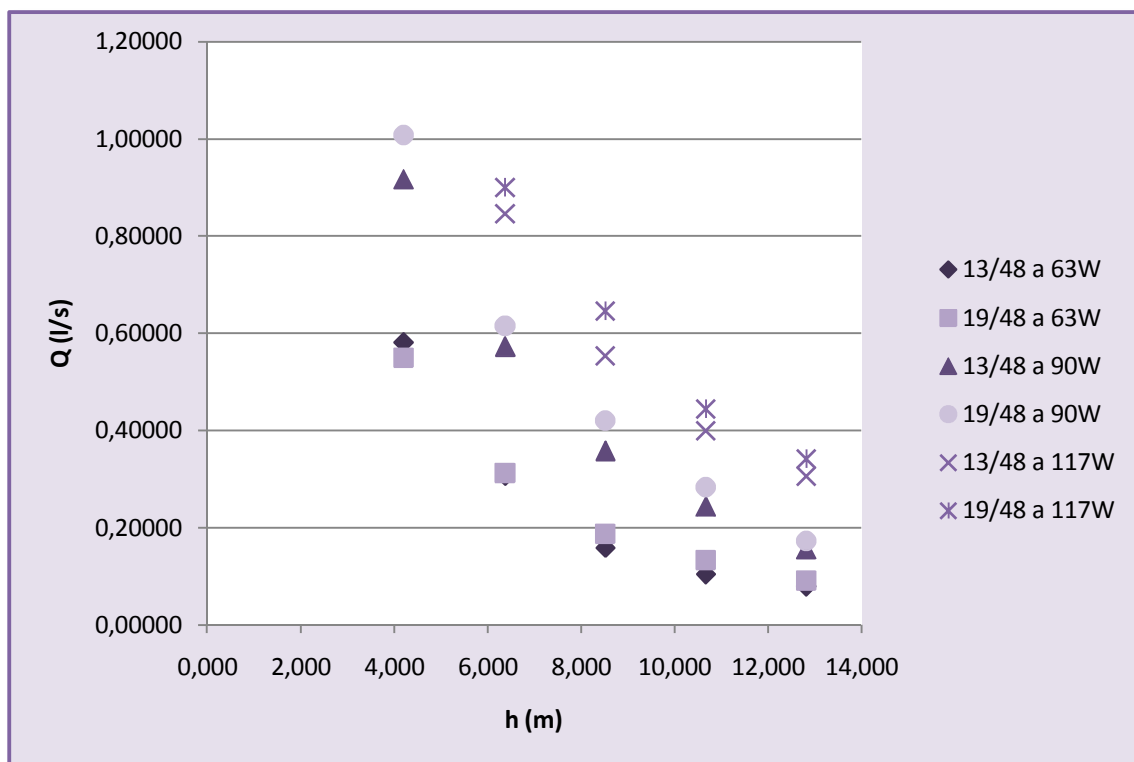


Figura 37. Caudal experimental frente a altura en bomba de mecate motorizada (diferentes alturas)

En la Figura 37 se puede observar como el caudal extraído disminuye en función del valor de la altura puesto que, hay que vencer la fuerza de rozamiento de frenado lo que provoca una disminución del caudal y de las revoluciones de giro de la rueda motriz.

En el Anexo IX.A. Caudal experimental frente a frecuencia y en el Anexo IX.B. Caudal experimental frente a altura se encuentran una amplia extensión de gráficas individuales (donde se observa con mayor claridad las gráficas de la Figura 36 y de la Figura 37) en las que se distingue la potencia eléctrica suministrada al motor.

4.2.3. Comparación resultados ideales y experimentales

En el capítulo de base teórica fue conveniente plantear una ecuación donde se podía obtener el caudal ideal (ecuación número (16)) para poder apreciar

si en el sistema se debían tener en cuenta las pérdidas de agua o bien se podían despreciar obteniendo de esta forma un sistema con un gran rendimiento.

Para la comprobación del anterior razonamiento se procedió a una comparación de resultados ideales frente a experimentales. Además, según el análisis de esta comparación se pudo establecer una expresión teórica que se aproximaba a la realidad de la instalación, durante la extracción de agua.

Por lo que, durante este apartado se realizó una primera aproximación, en la que se formulaba que el caudal de pérdidas era prácticamente inexistente durante la extracción de agua, puesto que las pérdidas que se producían en la tubería debían ser mínimas debido a la mínima holgura establecida entre el pistón y la tubería:

$$Q_{p\acute{e}rdidas} \approx 0 \rightarrow Q_{te\acute{o}rico} \approx Q_{ideal} = \omega R_{rueda} \cdot \left(\frac{\pi}{4} (D^2_{InteriorTuber\acute{a}} - \pi \cdot D^2_{cuerda}) \right) \cdot \phi \quad (32)$$

Según la ecuación (32) se establece que el caudal ideal debió ser próximo al caudal experimental. Para comprobar si el modelo planteado funcionaba correctamente, se realizaba la comparación de resultados teóricos frente a experimentales utilizando para calcular el caudal teórico la ecuación (32).

En este apartado, se pudo apreciar los valores teóricos con la configuración motorizada, combinando los datos en los que se simulaban diferentes alturas (utilizando sistema de frenado) con los que se tomaron a una altura fija a 4,2 metros. Sin embargo, los datos por separado se encuentran en las tablas mostradas en el *Anexo VIII.A. Caudal extraído e ideal* (datos de bomba de mecate motorizada diferenciándose los que se tomaron con fuerzas de frenado y los que no), también se puede apreciar en el *Anexo IX.C. Comparación caudal teórico ideal frente a experimental*, las gráficas correspondientes.

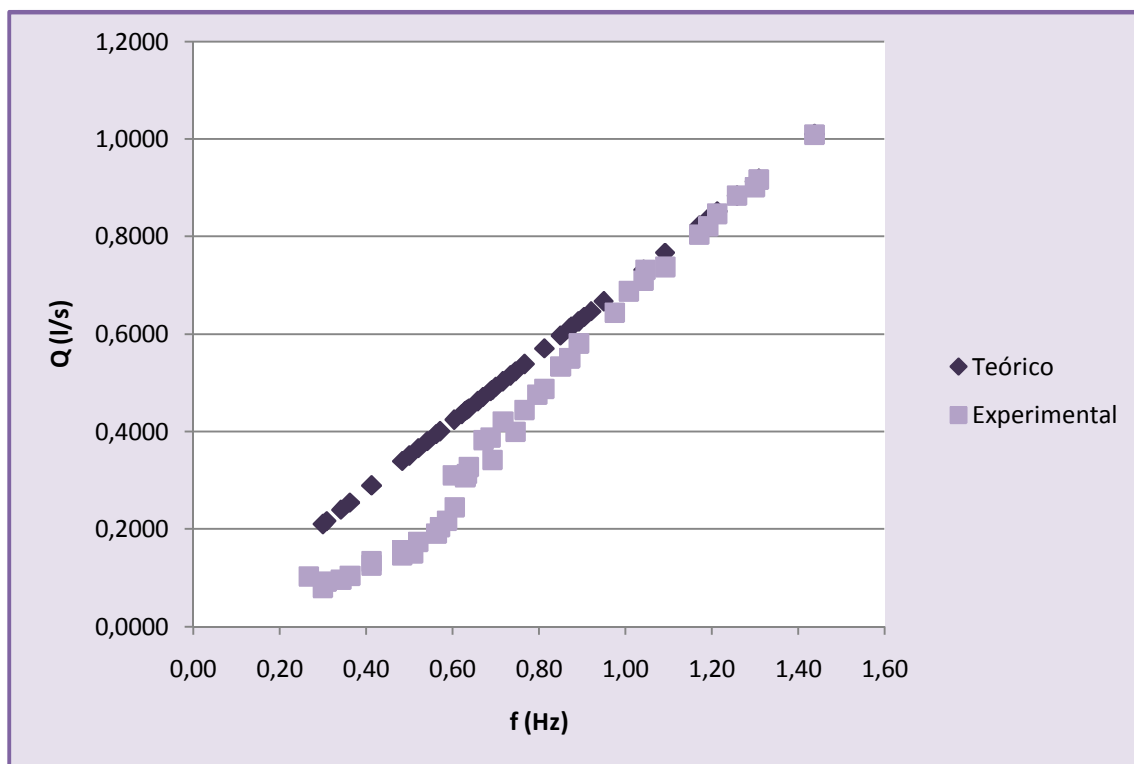


Figura 38. Comparación caudal teórico ideal y experimental frente a frecuencia

Como se puede apreciar la afirmación de despreciar las pérdidas es falsa, por lo que, se tuvo que reformular la ecuación teórica del caudal. La Figura 38 demuestra que el caudal de pérdidas es muy importante durante la extracción de agua, pudiéndose comprobar como para frecuencias menores es más elevado que para frecuencias mayores, por lo tanto se puede extraer la conclusión de que el caudal de pérdidas no es constante sino que varía con la velocidad de giro de la rueda motriz o la velocidad de ascenso de los pistones por la tubería.

Conociendo los parámetros del caudal experimental y teórico en el caso anterior (caudal teórico en ese caso era igual al caudal ideal), se podía analizar el caudal de pérdidas que se obtenía en la instalación en función de la frecuencia, alcanzándose la siguiente gráfica donde se consideraba la diferencia entre ambos parámetros, estableciendo con ello el caudal de pérdidas:

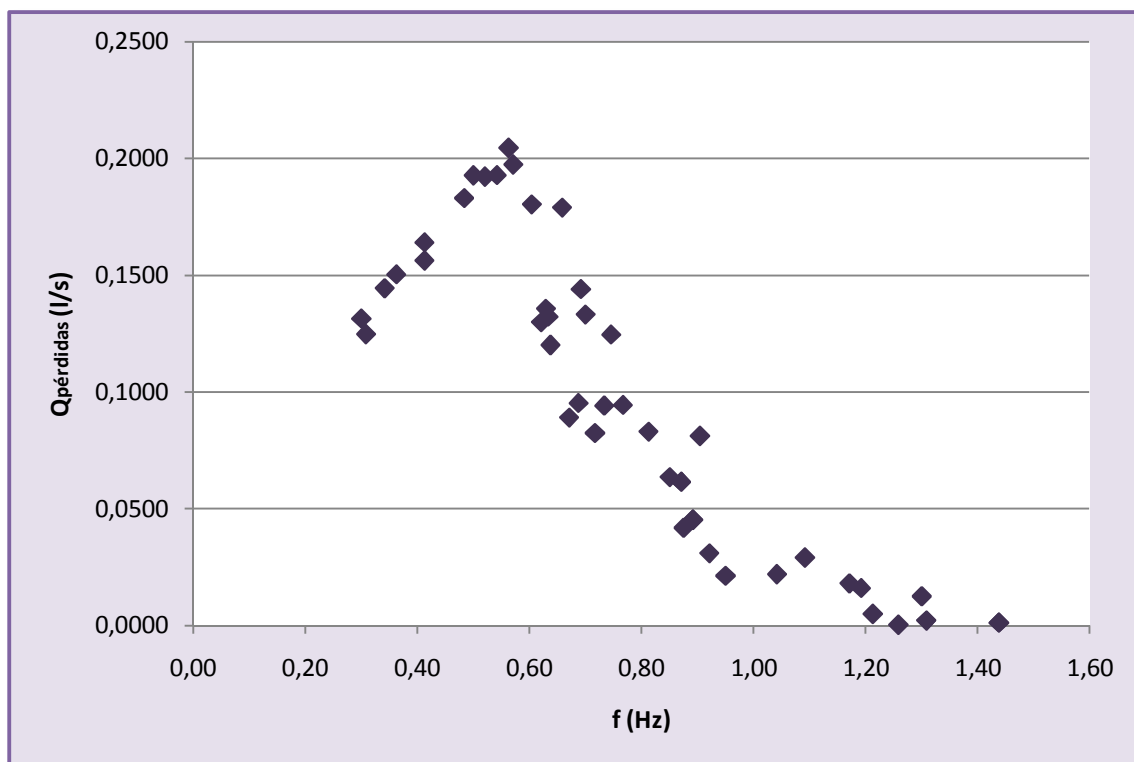


Figura 39. Diferencia entre caudal teórico ideal y experimental

La Figura 39 muestra como el caudal de pérdidas a altas frecuencias ($f > 1\text{Hz}$) tiende a ser despreciable acercándose a cero. También, se puede extraer que a frecuencias próximas a $0,55\text{Hz}$, aparece el caudal de pérdidas máximo. A frecuencias menores de $0,55\text{Hz}$ se produce un aumento del caudal de pérdidas a medida que la frecuencia aumenta, mientras que a frecuencias mayores de $0,55\text{Hz}$ se produce un descenso del caudal de pérdidas cuando la frecuencia aumenta.

En los siguientes apartados se establece un valor teórico del caudal de pérdidas en función de la gráfica observada, dividiéndose según los puntos de inflexión que posee la misma. Además, se procedió a estudiar más intensamente algunos de los tramos para una mayor comprensión del sistema.

En definitiva, se realizó un estudio más intenso de las pérdidas de agua que se muestran en la Figura 39, caracterizando teóricamente la ecuación del caudal de pérdidas dependiendo ésta de la frecuencia, y se estudió el

comportamiento de la bomba de mecate a frecuencias menores de 0,55Hz, donde se aprecia un comportamiento más incierto. Por tanto, en los siguientes apartados se abordan estas cuestiones, analizando el caudal de pérdidas en función de la velocidad de ascenso de los pistones y volviendo a analizar los resultados teóricos frente a los experimentales.

4.2.4. Caracterización teórica del caudal de pérdidas

En este punto se pretendió obtener una ecuación teórica, que se aproximase a la realidad del caudal de pérdidas que se estaba obteniendo en el sistema durante la extracción de agua. Para ello, se identificó el parámetro que hacía variar el caudal de pérdidas, siendo éste la velocidad a la que ascendían los pistones por la tubería. Por lo que, el caudal de pérdidas dependió en todo momento, de las revoluciones que se producían en el eje de la rueda en un tiempo determinado, y que provocaba el funcionamiento del sistema.

Para poder extraer conclusiones del caudal de pérdidas, fue necesario analizar la Figura 39 por tramos, según se iba produciendo cambios o puntos de inflexión en la misma. Por tanto, en dicha gráfica se distinguen tres tramos, los cuales tienen comportamientos muy diferentes según el valor de la frecuencia:

- Si f se encuentra entre el rango: $x < f < 0,55\text{Hz}$
- Si f se encuentra entre el rango: $0,55 < f < 1,00\text{Hz}$
- Si f se encuentra entre el rango: $f > 1,00\text{Hz}$

Se analizaron dichos tramos para poder formular una ecuación teórica con la que poder contabilizar las pérdidas de agua, dependiendo de la frecuencia de giro.

4.2.4.1. Caracterización teórica del caudal de pérdidas para $x < f < 0,55\text{Hz}$

En los anteriores proyectos no fue analizado este tramo puesto que, a frecuencias menores de 0,55 Hz el sistema se volvía muy sensible, obteniéndose unos valores no muy concluyentes, además con la configuración manual era muy difícil trabajar a frecuencias tan bajas.

Si se acota la gráfica del caudal de pérdidas a valores de frecuencia menores a 0,55 Hz, se obtendría el siguiente tramo:

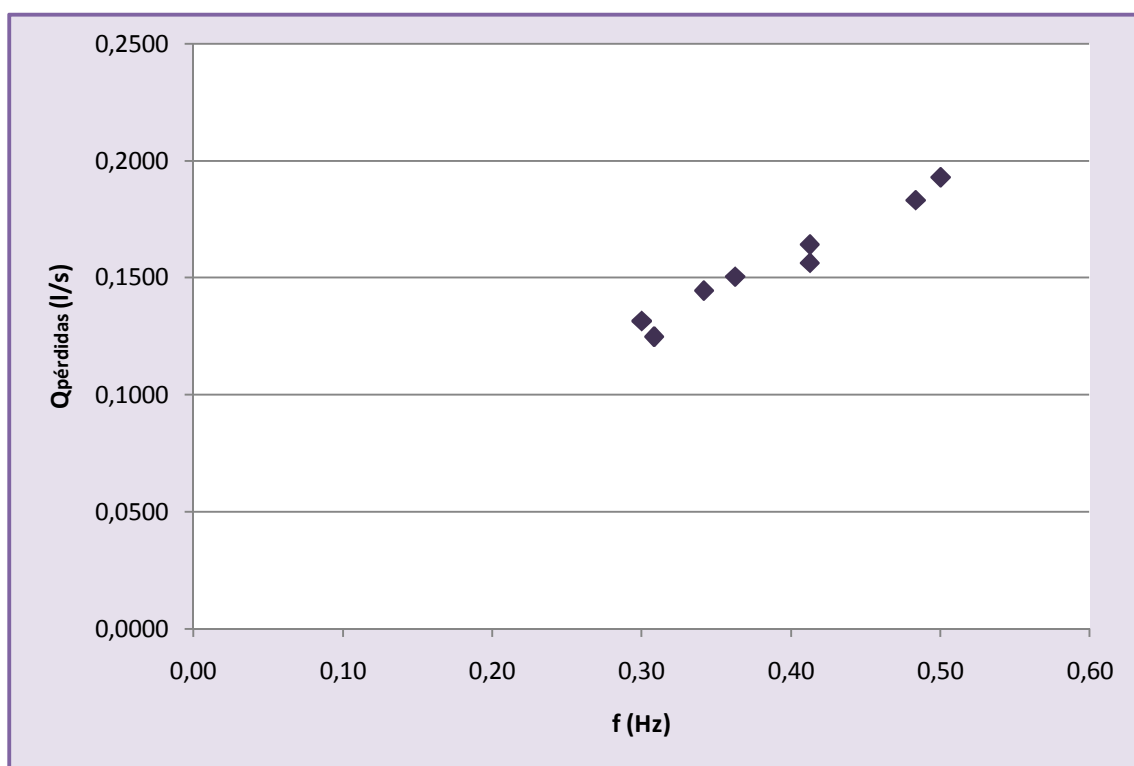


Figura 40. Caudal de pérdidas tramo $x < f < 0,55\text{Hz}$

En la Figura 40 se puede observar claramente como el caudal de pérdidas va aumentando conforme asciende la frecuencia.

Este tramo tuvo que ser acotado inferiormente puesto que, debía existir un punto inferior en el cual no se pudiera extraer agua siendo el caudal de

pérdidas mayor que el caudal experimental. Por lo que, se debió acotar este tramo inferiormente, hallando justo el punto de frecuencia desde el cual no se permitía la extracción de agua, igualándose en ese punto la velocidad de pérdidas a la velocidad de ascenso de la columna de agua.

Por tanto, para acotar este tramo se calculó la velocidad angular crítica definida como la mínima para la cual se extrae agua, es decir, la velocidad angular que aportaría un caudal teórico igual al caudal de pérdidas.

$$\begin{aligned}
 Q_{teórico} &= w \cdot R_{rueda} \cdot (A_{tubería} - A_{cuerda}) \cdot \phi - Q_{pérd.estático}^2 \\
 Q_{teórico} &\geq 0 \rightarrow w_{crit} \cdot R_{rueda} \cdot (A_{tubería} - A_{cuerda}) \cdot \phi \geq Q_{pérd.estático} \\
 w_{crit} &\geq \frac{Q_{pérd.estático}}{R_{rueda} \cdot (A_{tubería} - A_{cuerda}) \cdot \phi} = \frac{1,92 \cdot 10^{-4}}{0,1986 \cdot 10^{-4} \cdot 0,993} = 1,715 \text{ rad / s} \\
 f_{crit} &\geq 0,273 \text{ Hz}
 \end{aligned} \tag{33}$$

Una vez obtenido dicho valor se pudo acotar el tramo y obtenerse una ecuación para el caudal de pérdidas en función de la frecuencia:

² El caudal de pérdidas estático se calculó en el punto 4.2.5.1.

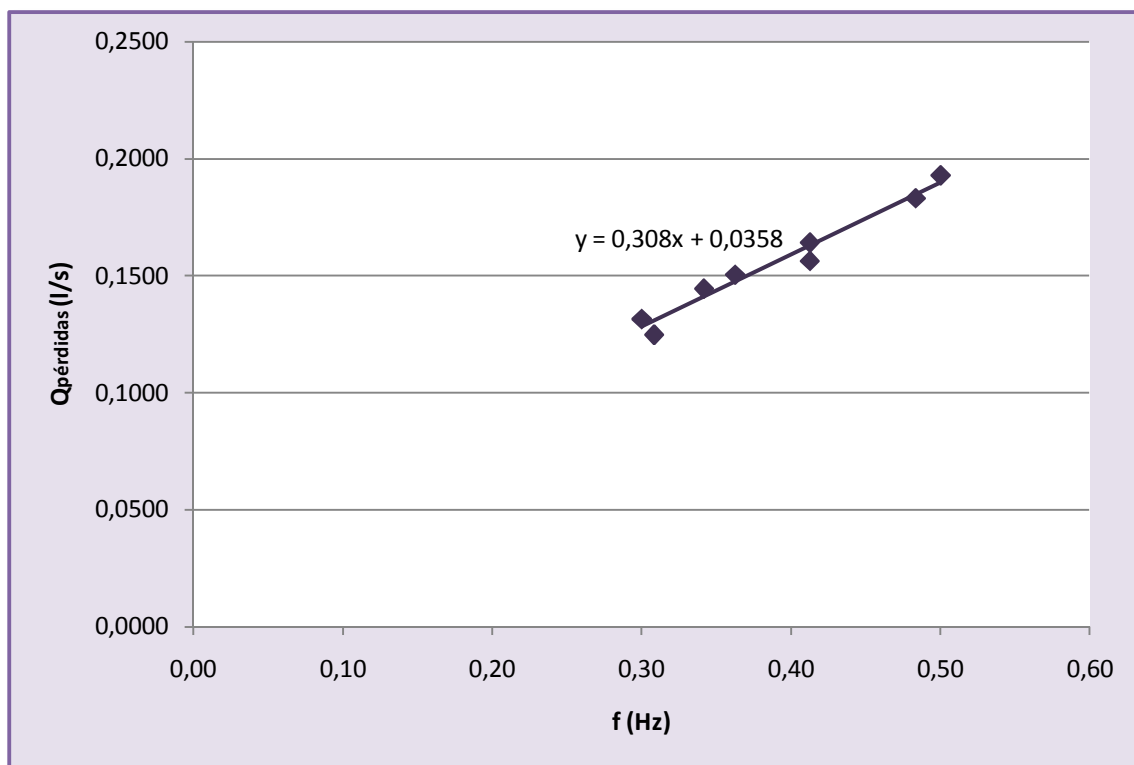


Figura 41. Recta de caudal de pérdidas tramo $0,27 < f < 0,55 \text{ Hz}$

Basándose en los resultados anteriormente expuestos se llega a la siguiente expresión:

$$Q_{\text{pérdidas}} = 0,308 \cdot f + 0,0358 \rightarrow \text{Si } 0,27 < f < 0,55 \text{ Hz} \quad (34)$$

4.2.4.2. Caracterización teórica del caudal de pérdidas para $0,55 < f < 1 \text{ Hz}$

En este apartado se realizó el mismo procedimiento que en el anterior, sólo que se tuvo en cuenta otro tramo del caudal de pérdidas.

Si se acota la gráfica del caudal de pérdidas a valores de frecuencia entre 0,55 Hz y 1,00 Hz, se obtendría el siguiente tramo:

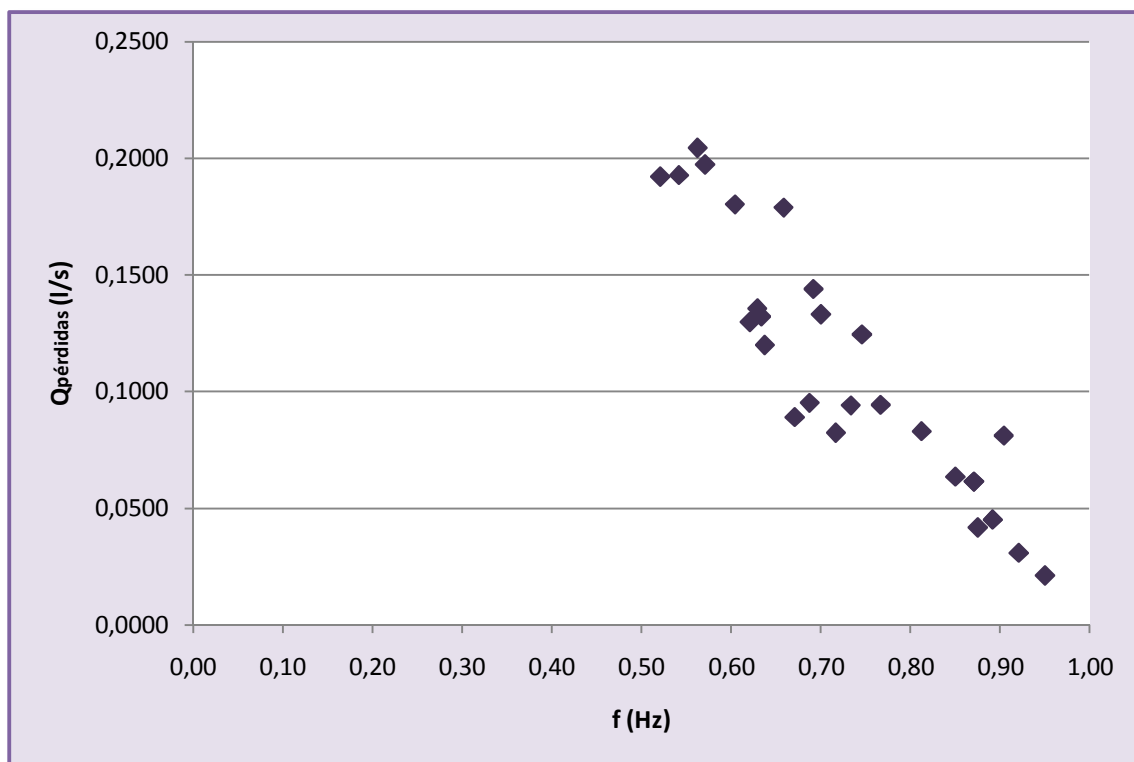


Figura 42. Caudal de pérdidas tramo $0,55 < f < 1,00 \text{ Hz}$

En la Figura 42 se observa un comportamiento muy diferente al de la gráfica de la Figura 41. Ya que, en la gráfica de la Figura 42 el caudal de pérdidas disminuye con la frecuencia, hasta obtenerse valores próximos a cero. Esto significa que conforme se va aumentando el valor de la velocidad de subida del pistón se va obteniendo menores pérdidas, llegando a un punto en el cual la velocidad de pérdidas de la columna superior se iguala con las de la columna inferior.

Se calcula la ecuación del caudal de pérdidas imponiendo la condición de que el caudal de pérdidas disminuye linealmente con la frecuencia:

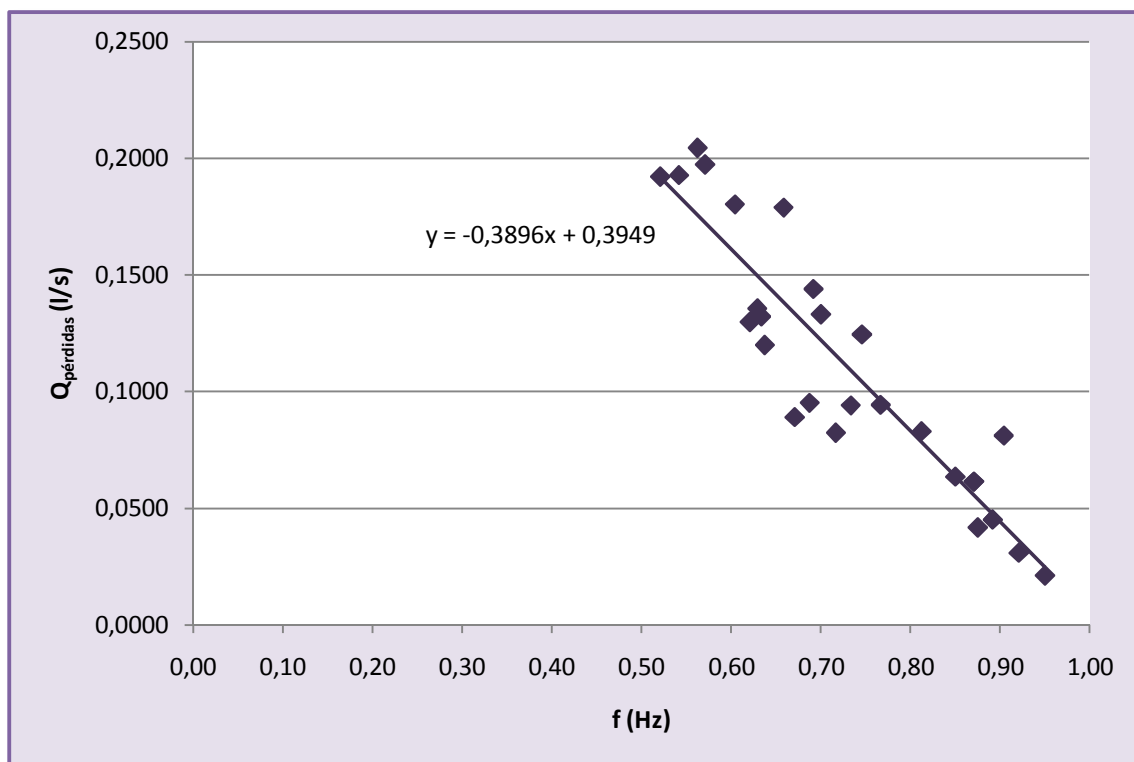


Figura 43. Recta de caudal de pérdidas tramo $0,55 < f < 1,00 \text{ Hz}$

Basándose en los resultados anteriormente expuestos se llega a la siguiente expresión:

$$Q_{\text{pérdidas}} = -0,3896f + 0,3949 \rightarrow \text{Si } 0,55 < f < 1,00 \text{ Hz} \quad (35)$$

4.2.4.3. Caracterización teórica del caudal de pérdidas para $f > 1,00 \text{ Hz}$

Por último se caracterizó el caudal de pérdidas para el tramo de frecuencias mayor de 1,00 Hz.

Como se puede observar en el gráfico de la Figura 39, este tramo tiende a cero, por lo que, en estos puntos se puede igualar el caudal teórico con el caudal experimental.

Por consiguiente, basándose en los resultados gráficos se puede establecer:

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = 0 \rightarrow Si \ f > 1,00 \text{ Hz} \quad (36)$$

4.2.4.4. Corrección del caudal teórico

Con las ecuaciones halladas anteriormente se podía calcular el caudal de pérdidas, sin considerarlo constante (19). Por lo que, se pudo reformular el caudal teórico dependiendo en todo momento de la velocidad de la rueda motriz o de la frecuencia considerada.

En definitiva, una vez que se calcularon los nuevos valores del caudal teórico, se procede a realizar una comparación entre los datos obtenidos experimentalmente y los datos teóricos. Los nuevos valores del caudal teórico se encuentran recogidos en el *Anexo VIII.B. Caudal teórico corregido teniendo en cuenta las pérdidas*, así como las gráficas individuales se encuentran en el *Anexo IX.E. Comparación caudal teórico y experimental*.

En la siguiente gráfica se muestra la comparación entre el valor del caudal teórico y experimental con todos los datos que se tomaron en la configuración de bomba de mecate motorizada:

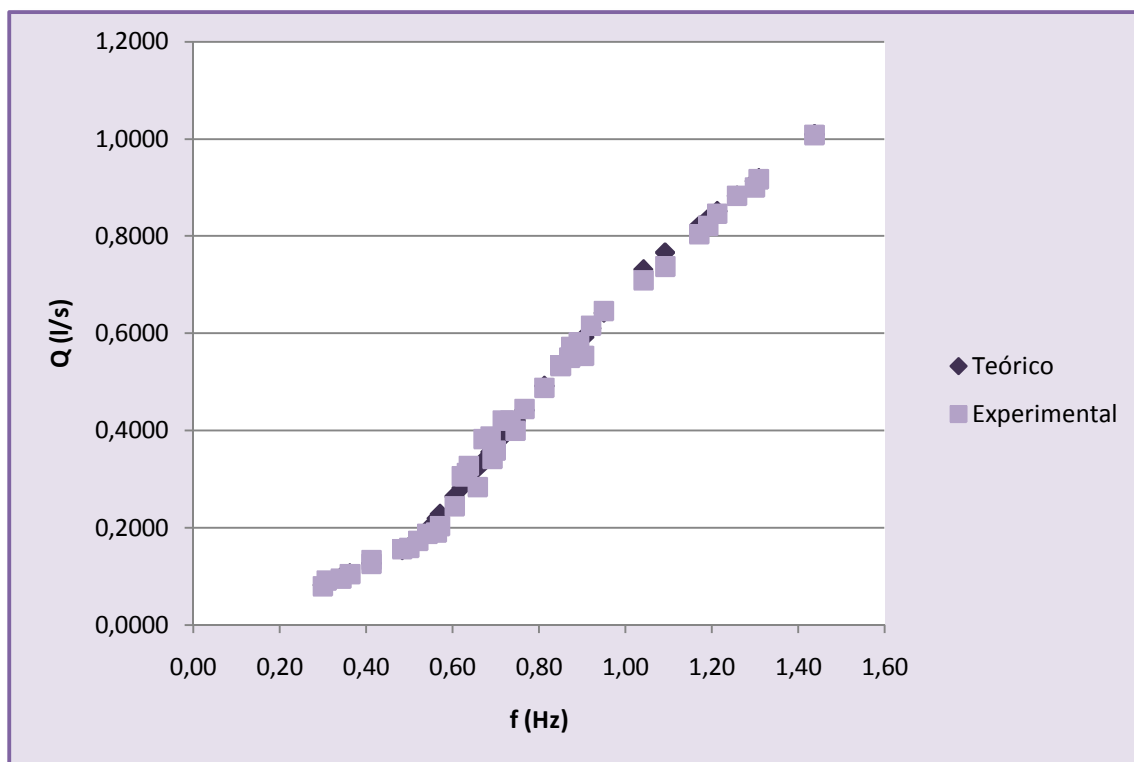


Figura 44. Comparación entre el caudal teórico y el experimental

Una vez corregida la expresión del caudal teórico, se mostraba en la siguiente gráfica la diferencia existente entre el caudal teórico y el caudal experimental, analizándose de forma porcentual la desviación existente entre el caudal experimental y el caudal teórico.

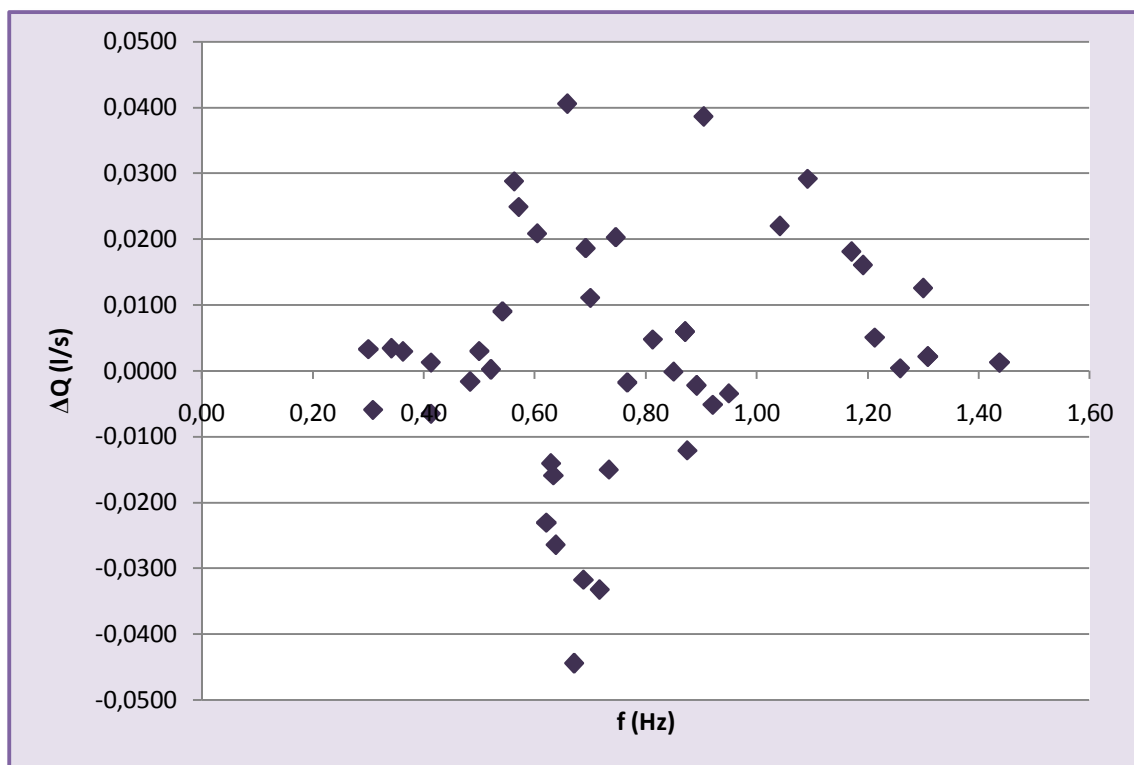


Figura 45. Error relativo caudal teórico y experimental

Las gráficas anteriores demuestran que la ecuación hallada para el caudal teórico, siendo contabilizadas las pérdidas de forma no constante, ha sido formulada correctamente, ya que se ha conseguido obtener un caudal teórico próximo al caudal experimental, extraído durante la toma de datos.

4.2.5. Caracterización teórica del caudal de pérdidas para bajas frecuencias

En estos apartados se caracterizó el caudal de pérdidas cuando el sistema se encontraba estático y cuando se encontraba en pleno funcionamiento. Estudiándose el caudal de pérdidas para bajas velocidades de ascenso de los pistones por la tubería, ya que el resultado obtenido en el epígrafe anterior aportaba un comportamiento impredecible de la instalación, puesto que el caudal de pérdidas para bajas frecuencias se estimaba que podía ser constante.

4.2.5.1. Caracterización teórica del caudal de pérdidas estático en vacío

En este punto se aborda la cuestión analizando el caudal de pérdidas estático, es decir, cuando la instalación se encuentra en reposo o en vacío (no trabajando). Por lo que, se constató a la velocidad que descendía el agua por la tubería de bajada, observándose el comportamiento de este parámetro, cuando en un instante anterior se había producido el giro de la rueda motriz.

El experimento a realizar consistió en suministrar una potencia constante a la bomba de mecate, suficiente para poder extraer agua, una vez que la tubería de ascenso se encontraba totalmente llena, se dejaba de suministrar potencia y se medía la velocidad de descenso, a través de la tubería transparente.

Para poder cuantificar esta prueba fue necesario disponer de un metro de medida y de un cronómetro. Realizándose los siguientes pasos:

1. Se escogieron dos marcas de medida con el metro que se encontraba suspendido en el piso inferior a lo largo de la tubería transparente, una al comienzo de la tubería transparente y otra cerca del techo (1,75 metros).
2. Se llenaba la tubería de ascenso por completo a una frecuencia determinada.
3. Se dejaba salir agua por el surtidor para dejar de suministrar potencia a la bomba de mecate.
4. El frente de agua descendía, midiéndose el tiempo que pasaba entre las dos marcas realizadas.

En este caso la velocidad de pérdidas a tener en cuenta, se presenta en la Figura 46, como v_{P1} , produciéndose las pérdidas a lo largo de todo el área de

la tubería puesto que, no existía ninguna fuerza de ascenso, lo que provocaba que los pistones descendiesen con toda la columna de agua.

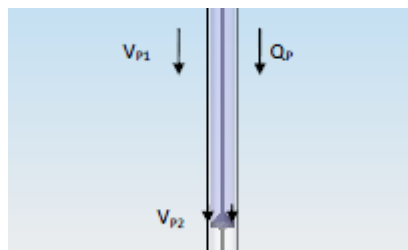


Figura 46. Volumen de pérdidas en la tubería de ascenso

La ecuación que relaciona en este caso el caudal de pérdidas con la velocidad es la siguiente:

$$\begin{aligned} Q_{\text{pérdidas}} &= Q_{\text{tubería}} + Q_{\text{ideal}} = (v_{\text{columnaagua}} \cdot A_T) + (w_r \cdot R_r \cdot A_T \cdot \phi) \\ Q_{\text{pérdidas}} &= \left(\frac{d_{A-B}}{t} + (w_r \cdot R_r \cdot \phi) \right) \left(\frac{\pi}{4} (D_{\text{Tubería}}^2 - D_{\text{Cuerda}}^2) \right) \end{aligned} \quad (37)$$

Se realizaron varias pruebas con distintas velocidades de giro consideradas en la instalación, obteniendo así datos más clarividentes.

El caudal de pérdidas cuando se suministra una potencia eléctrica de 27W fue de 0,191 l/s. Encontrándose los datos representados en la siguiente tabla:

f (Hz)	Distancia (m)	Tiempo vaciado (s)	Q perd. est. (l/s)
0,45	1,75	5,28	0,188
0,44	1,75	5,31	0,187
0,45	1,75	5,29	0,188
0,44	1,75	5,04	0,197
0,46	1,75	5,15	0,193
			0,191

Tabla 9. Caudal de pérdidas trabajando en vacío para una frecuencia anterior de 0,44 Hz

El caudal de pérdidas cuando se suministra una potencia eléctrica de 54W fue de 0,193 l/s. Encontrándose los datos representados en la siguiente tabla:

f (Hz)	Distancia (m)	Tiempo vaciado (s)	Q _{perd. est.} (l/s)
0,73	1,75	5,17	0,192
0,73	1,75	5,25	0,190
0,75	1,75	5,14	0,194
0,74	1,75	5,19	0,192
0,73	1,75	5,09	0,195
			0,193

Tabla 10. Caudal de pérdidas trabajando en vacío para una frecuencia anterior de 0,73 Hz

Los dos caudales de pérdidas para diferentes frecuencias obtenidos, demuestran que cuando el sistema se encuentra en reposo, los pistones descienden a la misma velocidad por la tubería de ascenso de agua, no teniendo en cuenta los instantes iniciales, por lo que, sólo depende del peso de la columna de agua que se encuentra en la tubería.

En definitiva, el caudal de pérdidas estático, es decir, cuando la frecuencia sea nula será igual a 0,192 l/s.

$$f = 0 \rightarrow Q_{p\acute{e}rdidas} = 0,192 \text{ l/s} \quad (38)$$

Con este dato se obtuvo un nuevo punto del caudal de pérdidas, quedando la gráfica de la siguiente forma:

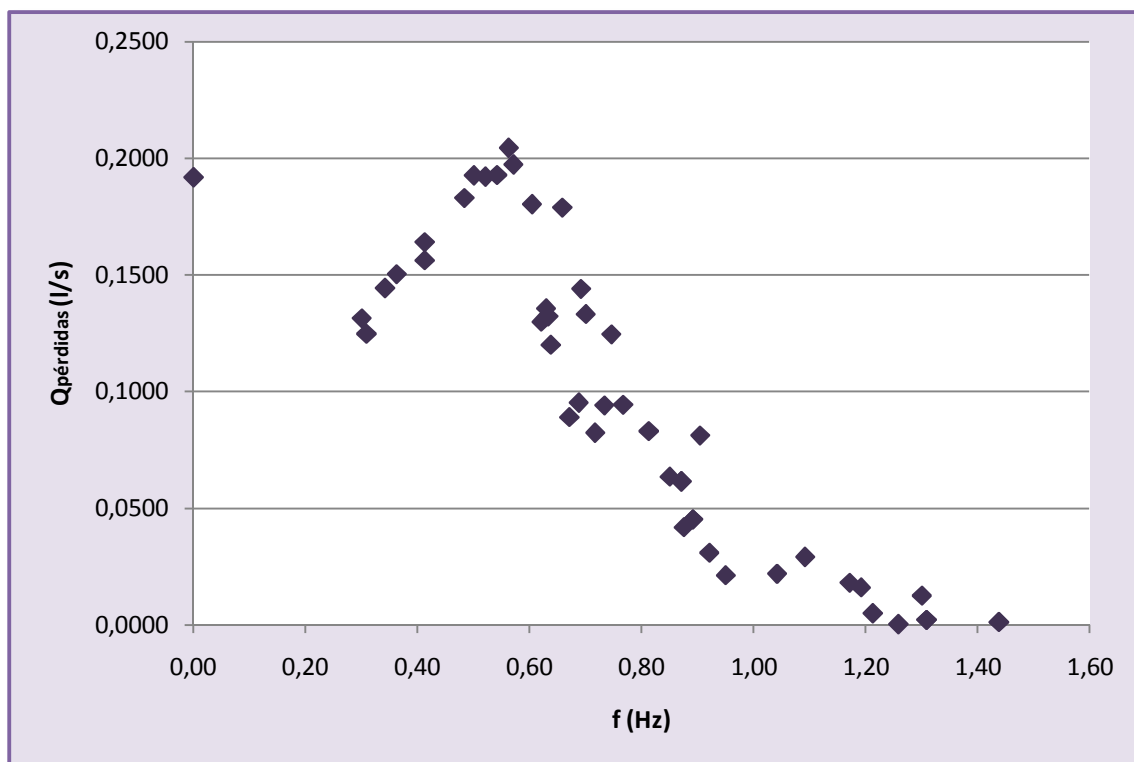


Figura 47. Caudal de pérdidas en vacío y dinámico

4.2.5.2. Caracterización teórica del caudal de pérdidas a bajas frecuencias aportando potencia

El apartado anterior dejaba más dudas respecto al comportamiento de las pérdidas que se obtenían en la bomba de mecate puesto que, el punto último de frecuencia, a la que se podía extraer agua, fue de 0,3 Hz produciéndose un caudal de pérdidas de 0,1315 l/s, sin embargo si el sistema se encontraba en reposo se producía unas pérdidas de 0,192 l/s, por lo que, el tramo que representaba una frecuencia nula hasta la frecuencia mínima a la que se podía extraer agua poseía un comportamiento incierto e impredecible.

Durante estos apartados se estudiaron los puntos a baja frecuencia para poder esclarecer el comportamiento de las pérdidas a frecuencias en las que la bomba no podía extraer agua, pero sin embargo, los pistones seguían moviéndose linealmente por la tubería como consecuencia de producirse

rotación en la rueda motriz. El problema es que a esas velocidades los pistones no ejercían la suficiente presión para poder levantar la columna de agua.

Se realizaron dos estudios para comprobar el comportamiento que seguía el caudal de pérdidas cuando no se producía extracción de agua. Para ello, se calculó la velocidad de ascenso de la columna de agua y la velocidad de descenso de la misma para unas frecuencias menores de 0,55 Hz.

❖ *Estudio comprobando velocidad de descenso:*

Para realizar esta toma de datos fue necesario disponer de una cámara de video que se utilizó para grabar la tubería transparente de ascenso, situada en el piso inferior, dicha tubería contaba con un metro de medida para conocer a qué distancia se encontraba el fluido en cada momento, mientras que en la parte superior se debió medir, con el tacómetro, las revoluciones de la rueda motriz de la bomba de mecate durante la prueba.

En el ensayo se comenzó suministrando a la bomba de mecate suficiente potencia para extraer agua, poco a poco se iba descendiendo ésta, hasta que comenzaba a salir de la tubería un “hilo” de agua. Conociendo la corriente suministrada para que saliera dicho “hilo” se volvía a descender la potencia de transmisión variando muy poco la misma y dejándola constante para el resto de experimento, por lo que, al dejar de salir agua por la tubería comenzaba a descender lentamente la columna de agua por la tubería de ascenso, ya que aunque no se podía extraer agua los pistones seguían ascendiendo.

En el experimento se midió el tiempo que tardaba en descender la columna de agua por la tubería, midiendo el tiempo que tardaba la columna de agua en pasar por las diferentes marcas realizadas en el metro, a la vez que se seguía suministrando potencia al sistema, aunque dicha potencia no era suficiente para hacer ascender la columna de agua.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

En el área o piso superior, donde se encontraba la bomba de mecate, se midió las revoluciones de la rueda motriz desde que se empezaba a dejar de extraer agua hasta que descendía por completo la columna de agua. En el tiempo que transcurrió este suceso se mantuvo la potencia eléctrica suministrada al motor constante.

Según el procedimiento del experimento descrito se recogieron varios datos en el piso superior y en el piso inferior. Los datos obtenidos en la instalación superior fueron:

W_e (W)	n (rev)	T (min)	w (r.p.m.)	f (Hz)
9	26	1,8	14,44	0,24

Tabla 11. Frecuencia para el cálculo de la velocidad de descenso de la columna de agua

En el piso inferior se midió cuanto tiempo tardaba la columna de agua en pasar por las marcas realizadas en el metro, las cuales se encontraban cada 250 mm. Los datos que se obtuvieron fueron los siguientes:

Marcas	x (cm)	t (s)
1ª marca	300	0
2ª marca	275	6
3ª marca	250	4
4ª marca	225	18
5ª marca	200	11
6ª marca	175	4
7ª marca	150	29

Tabla 12. Cálculo de la velocidad de descenso de la columna de agua

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Con ambos datos combinados se pudo calcular el caudal de pérdidas para una frecuencia constante de 24 Hz, utilizando las ecuaciones (37):

Velocidad (m/s)	Q_{Ideal} (l/s)	$Q_{\text{pérdidas}}$ (l/s)
0,0417	0,0237	0,1940
0,0625	0,0355	0,2058
0,0139	0,0079	0,1782
0,0227	0,0129	0,1832
0,0625	0,0355	0,2058
0,0086	0,0049	0,1752
		0,1903

Tabla 13. Caudal de pérdidas calculando velocidad de descenso de la columna de agua

En este caso, el caudal de pérdidas para una frecuencia de 0,24 Hz fue igual a 0,1903 l/s.

Con este dato queda comprobado que el caudal de pérdidas a frecuencias en las que no se puede extraer agua, se mantiene constante, si se tiene en cuenta las pérdidas calculando la velocidad de descenso.

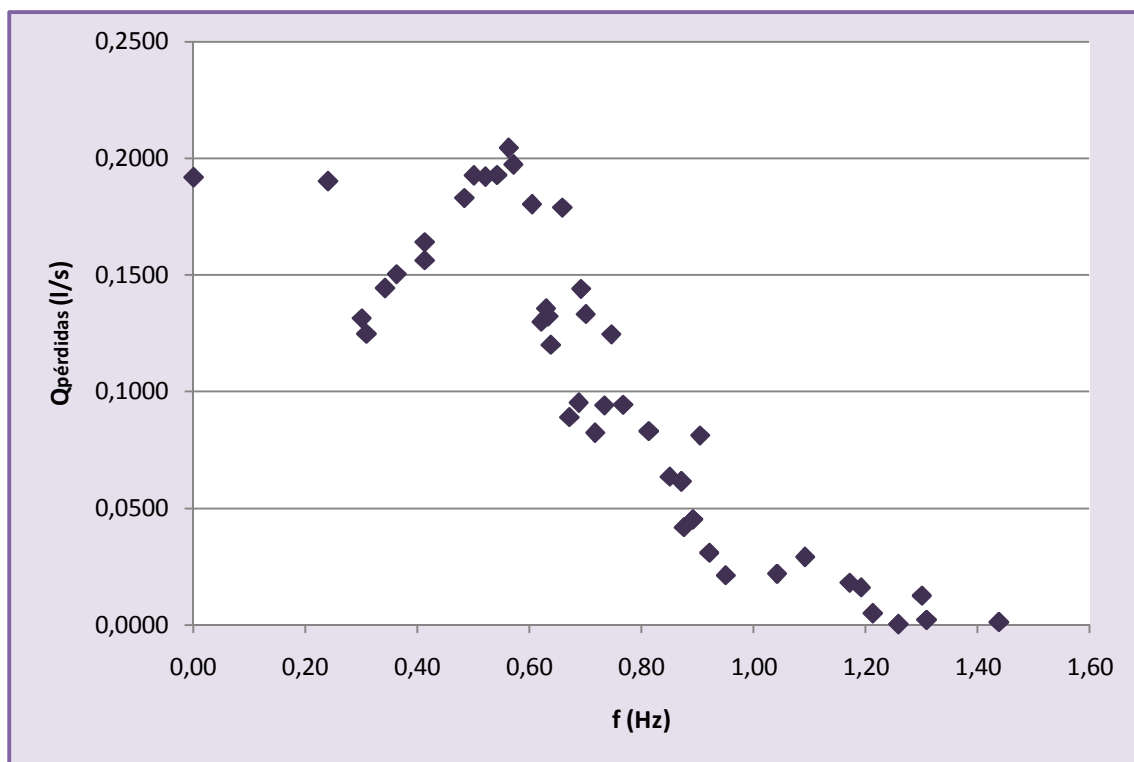


Figura 48. Caudal de pérdidas midiendo velocidad de descenso

La gráfica obtenida muestra que existe un comportamiento muy diferente en el caudal de pérdidas cuando se extrae agua y cuando no, por lo que, se seguirá investigando para poder caracterizar el sistema a bajas frecuencias.

❖ Estudio comprobando velocidad de ascenso:

En este experimento se realizó el mismo procedimiento que en el apartado anterior, sólo que esta vez se calcularía la velocidad de ascenso a una frecuencia baja pero suficiente para poder levantar la columna de agua.

En la parte superior se pudo obtener los siguientes parámetros:

W_e (W)	n (rev)	T (min)	w (r.p.m.)	f (Hz)
19,80	46	2,65	17,39	0,29

Tabla 14. Frecuencia para el cálculo de la velocidad de ascenso de la columna de agua

En la parte inferior se midió el tiempo de ascenso de la columna de agua en cada una de las marcas:

Marcas	x (cm)	t (s)
1ª marca	150	0
2ª marca	175	10
3ª marca	200	4
4ª marca	225	6
5ª marca	250	10
6ª marca	275	11
7ª marca	300	7

Tabla 15. Cálculo de la velocidad de ascenso de la columna de agua

Combinando ambos resultados se obtuvo el siguiente caudal de pérdidas, utilizando la ecuación (37):

Velocidad (m/s)	Q útil (l/s)	Q pérdidas (l/s)
0,0250	0,0142	0,1904
0,0250	0,0142	0,1904
0,0625	0,0355	0,1691
0,0417	0,0237	0,1809
0,0250	0,0142	0,1904
0,0227	0,0129	0,1917
		0,1855

Tabla 16. Caudal de pérdidas calculando velocidad de ascenso de la columna de agua

En este caso, el caudal de pérdidas para una frecuencia de 0,29 Hz fue igual a 0,1855 l/s.

Añadiendo estos dos últimos puntos a la gráfica del caudal de pérdidas se obtiene:

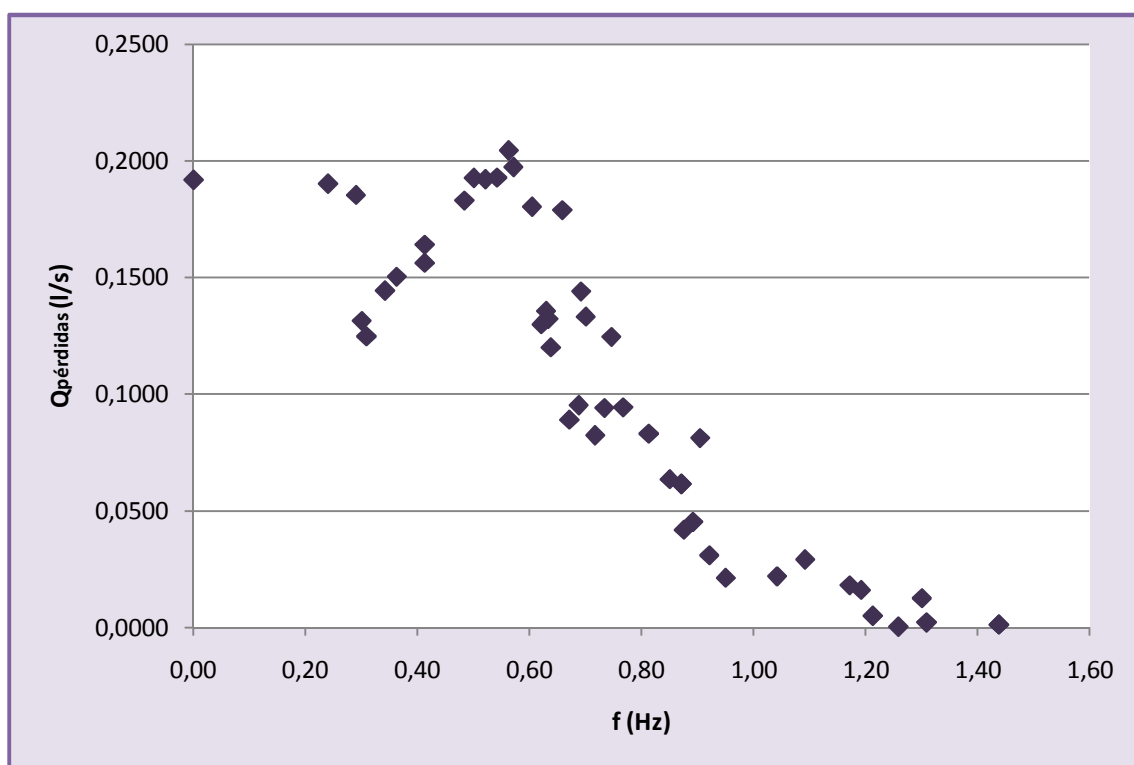


Figura 49. Caudal de pérdidas midiendo velocidad de ascenso

Según los resultados obtenidos en la Figura 49, se puede establecer que se está cometiendo un error durante la medición del caudal de pérdidas, ya que se obtienen resultados contradictorios. Mientras que en los datos experimentales de la Figura 39 (caudal de pérdidas hallado con la ecuación del caudal teórico) se obtenía que el caudal de pérdidas para frecuencias de 0,3 Hz estaba en torno a 0,1315 l/s en la en la Figura 49 se obtenía que para frecuencias de 0,29 Hz el caudal de pérdidas era de 0,1855 l/s. Por lo que, para

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

un mismo punto de frecuencia (0,29-0,3 Hz) en ambos sistemas aparecen resultados diferentes.

En definitiva, según los resultados el comportamiento de la instalación para bajas frecuencias se podía establecer de una de las siguientes formas:

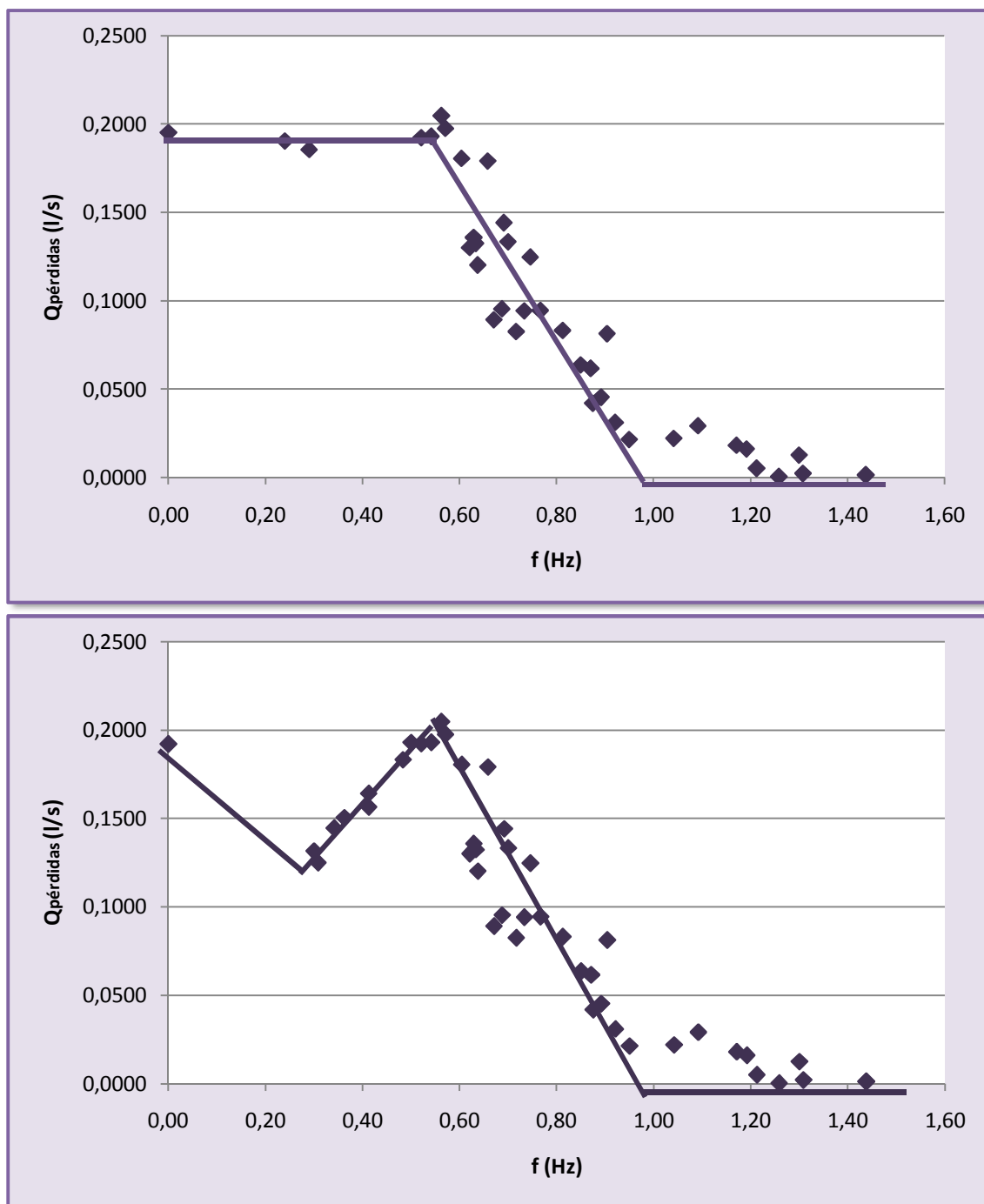


Figura 50. Caudal de pérdidas midiendo velocidad de columna de agua (gráfica superior) y considerando la diferencia entre datos experimentales y teóricos (gráfica inferior)

Al obtenerse resultados tan distintos se comenzó a estudiar ambas gráficas con el objetivo de hallar donde se encontraba el problema, la primera gráfica mostraba un comportamiento más fidedigno, al obtenerse un comportamiento en el fluido más estacionario y laminar, siendo constante el caudal de pérdidas en la tubería e igual o similar al agua desalojada cuando no se producía movimiento de los pistones. Por lo que, se comenzó a estudiar donde se podía estar produciendo el error, para finalmente, descubrir que éste era debido a un elemento de medida, concretamente por el caudalímetro encargado de medir el volumen desalojado en todo momento.

Cuando la bomba de mecate estaba trabajando a bajas frecuencias el fluido que se desalojaba para cada instante de tiempo, estaba presentado por un “hilo” de agua, el cual al pasar por el caudalímetro desplazaba el elemento rotativo de medida midiendo mayores cantidades de volumen de agua. Por lo que, a continuación se realizó la calibración del aparato de medida y se corrigieron las medidas tomadas a bajas frecuencias, ya que a frecuencias medias y altas (mayores de 0,6 Hz) se obtuvieron valores correctos en la recta de calibración.

4.2.6. Recta de calibración del caudalímetro para corrección del caudal

En este apartado se realizaron medidas para poder llevar a cabo una recta de calibración del aparato para contabilizar el volumen, para así poder corregir los datos experimentales hallados del caudal a bajas frecuencias.

Para poder llevar a cabo los ensayos se necesitó una báscula y un cubo. Y el procedimiento a realizar para poder lograr la recta de calibración fueron:

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

1. Se comenzaba a suministrar una frecuencia determinada constante durante toda la prueba por medio del motor eléctrico (la cual, se fue variando en cada experimento obteniendo un rango de frecuencia igual al considerado en las pruebas 0,3-1,0 Hz).
2. Se medía el agua desalojada en la tubería de descenso, por medio del caudalímetro, y de un cubo colocado al final de esta tubería.
3. Cuando el cubo se encontraba lleno la prueba se paraba, obteniendo el tiempo de duración de la misma.
4. Además del tiempo de duración, se obtenía la medida del volumen desalojado en la prueba por medio del caudalímetro y también se obtenía ese mismo volumen, pesando el cubo que se había llenado con el agua extraído durante la prueba.
5. La recta de calibración se realizó comparando ambos volúmenes.

Los datos que se obtuvieron en la prueba definida fueron los siguientes:

f (Hz)	Q caudalím. (l/s)	Q cubo (l/s)	ΔV (l)	ΔQ (l/s)
0,367	0,133	0,088	5,500	0,046
0,400	0,101	0,067	3,045	0,034
0,483	0,128	0,110	1,400	0,018
0,567	0,114	0,103	0,796	0,011
0,633	0,090	0,089	0,058	0,001
0,667	0,103	0,117	-0,790	-0,014
0,750	0,156	0,163	-0,201	-0,006

Tabla 17. Toma de datos para calibración del caudalímetro

La recta de calibración se pudo obtener comparando la variación del caudal frente a la frecuencia, siendo la gráfica que representaba esto la siguiente:

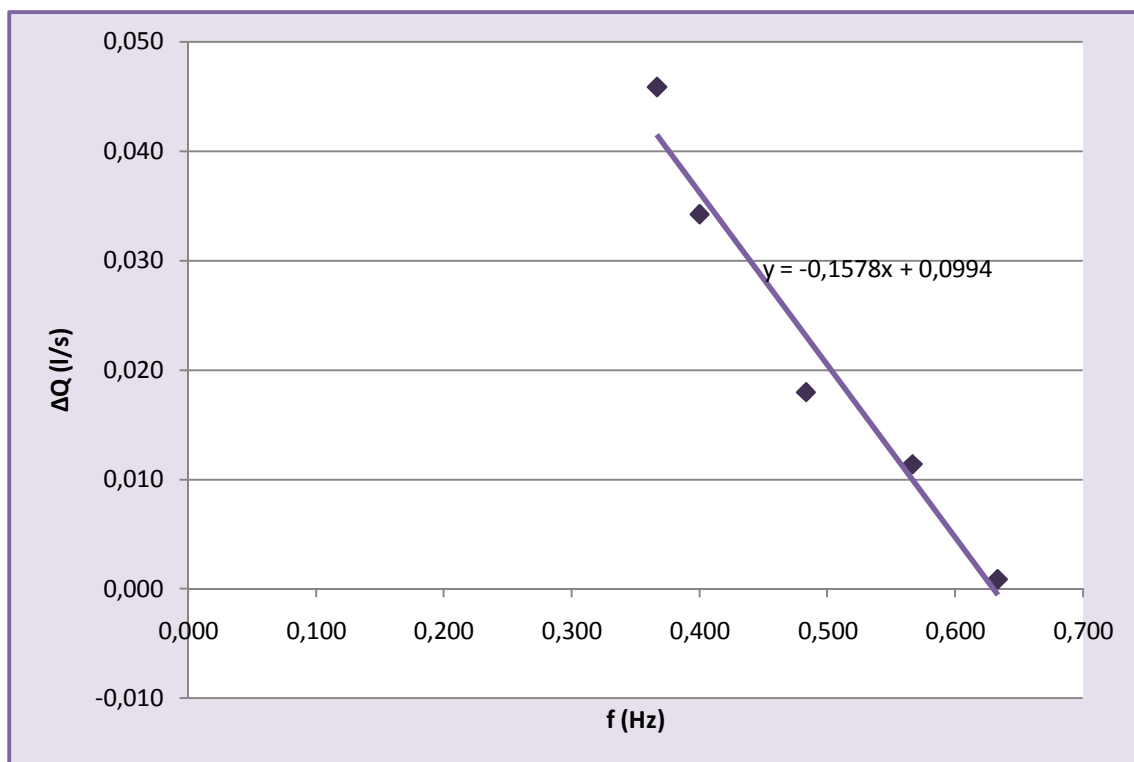


Figura 51. Recta de calibración del aparato de medida volumétrico

Por lo que, se obtuvo una ecuación donde el caudal desalojado o extraído dependía de la frecuencia o de la velocidad de giro de la rueda motriz, llegándose a la siguiente expresión:

$$\Delta Q = -0,578 \cdot f + 0,0994 \rightarrow \text{Si } 0,27 < f < 0,60 \text{ Hz} \quad (39)$$

La gráfica de calibración muestra que sólo era necesario corregir los datos en los que las frecuencias eran menores de 0,60 Hz, ya que en los mayores a ese valor no afectaba el fallo de medida del caudalímetro.

4.2.7. Corrección de los datos

En este apartado se corrigieron los datos afectados por el error cometido durante la toma de datos con el caudalímetro, recalculándose de nuevo el caudal experimental y el caudal teórico, mediante los mismos métodos anteriores, sólo que ésta vez se utilizó la ecuación (39) para hallar los nuevos caudales experimentales para frecuencias bajas. Todo lo expuesto en este apartado se encuentra desarrollado ampliamente en el *Anexo VIII.B.2. Caudales teniendo en cuenta calibración del contador volumétrico*.

Una vez corregido ciertos datos del caudal experimental, se procedía a establecer de nuevo la comparativa entre el caudal teórico (ecuación (32)) y el experimental:

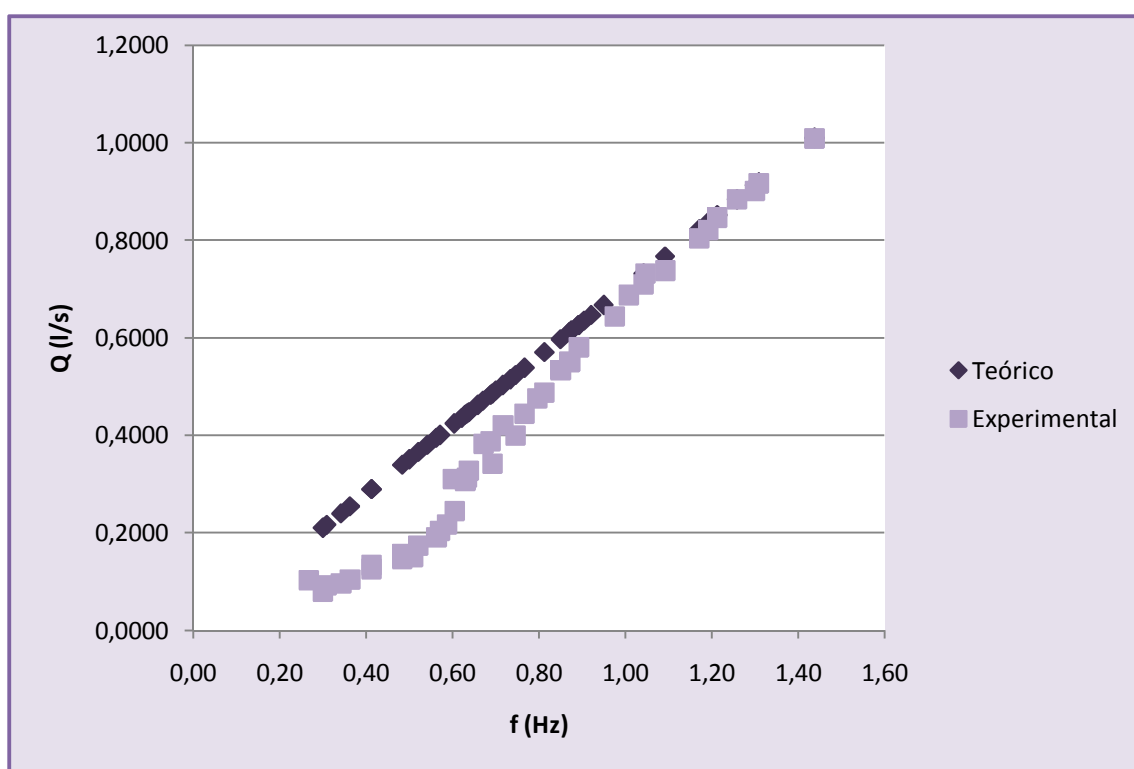


Figura 52. Comparación del caudal teórico ideal y experimental corregido frente a frecuencia

En esta nueva gráfica seguía obteniéndose una gran diferencia entre ambos caudales, ya que, se seguía considerando el caudal de pérdidas

despreciable, lo cual como se ha demostrado anteriormente no era correcto, debido a que siempre para frecuencias menores de 1,00 Hz se debieron considerar las pérdidas producidas en la tubería de ascenso, entre los pistones y la tubería.

La desviación existente entre ambos caudales en función de la frecuencia, demostró como para frecuencias menores de 0,55 Hz se debía considerar pérdidas de caudal uniformes muy próximas a 0,192 l/s:

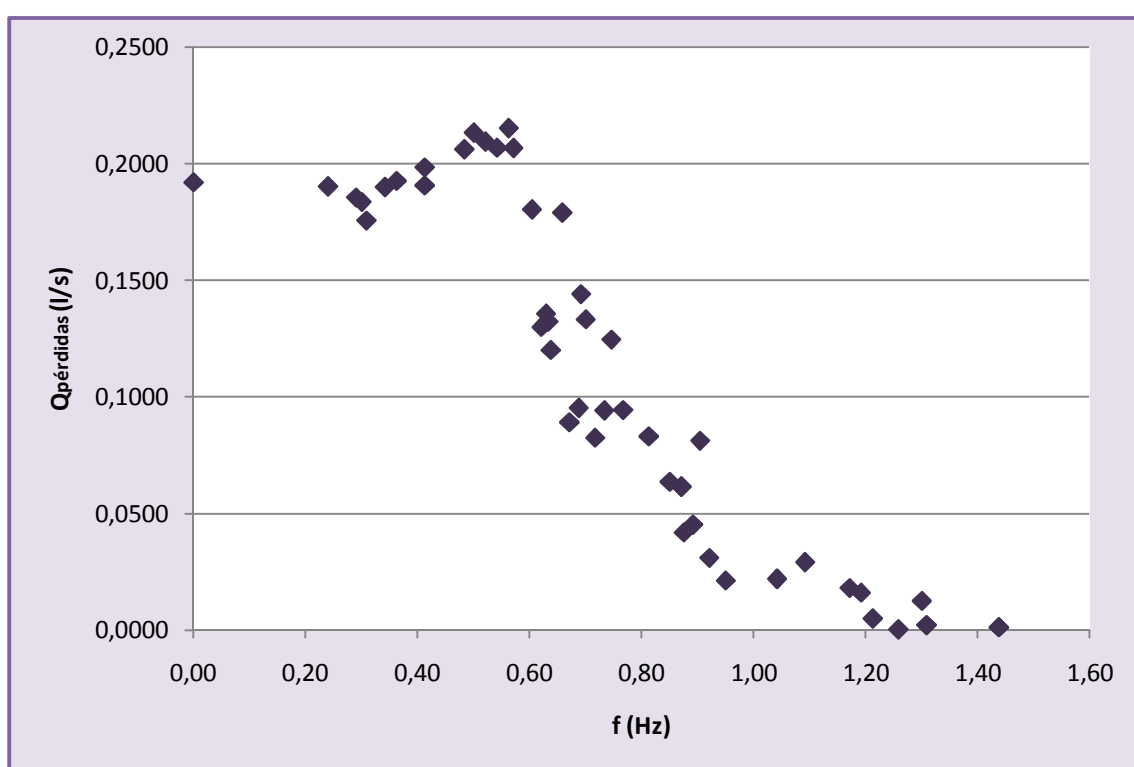


Figura 53. Diferencia entre caudal teórico y experimental corregido

Por lo que, quedó demostrado como el flujo de la tubería se comportaba de forma laminar, siendo uniforme y constante para bajas frecuencias. En definitiva, la gráfica de la Figura 53 muestra como el caudal de pérdidas a bajas frecuencias presentaba un comportamiento constante, muy cercano al caudal de pérdidas estático. Por lo que, basándose en los resultados anteriormente expuestos se llegó a la siguiente expresión:

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = 0,192 \text{ l/s} \rightarrow \text{Si } 0 < f < 0,55 \text{ Hz} \quad (40)$$

Corrigiendo todos estos datos finalmente se obtuvo la siguiente gráfica donde se consideraba las siguientes fórmulas para calcular el caudal teórico, asemejándose de esta forma al caudal experimental que se obtuvo durante todas las pruebas realizadas:

$$\begin{aligned} Q_{te\acute{o}rico} &= w_r \cdot R_r \cdot A_T \cdot \phi - 0,192 \text{ (l/s)} \rightarrow \text{Si } 0,27 < f < 0,55 \text{ Hz} \\ Q_{te\acute{o}rico} &= w_r \cdot R_r \cdot A_T \cdot \phi + 0,4109 \cdot f - 0,4124 \text{ (l/s)} \rightarrow \text{Si } 0,55 < f < 1,00 \text{ Hz} \\ Q_{te\acute{o}rico} &= w_r \cdot R_r \cdot A_T \cdot \phi \text{ (l/s)} \rightarrow \text{Si } f > 1,00 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (41)$$

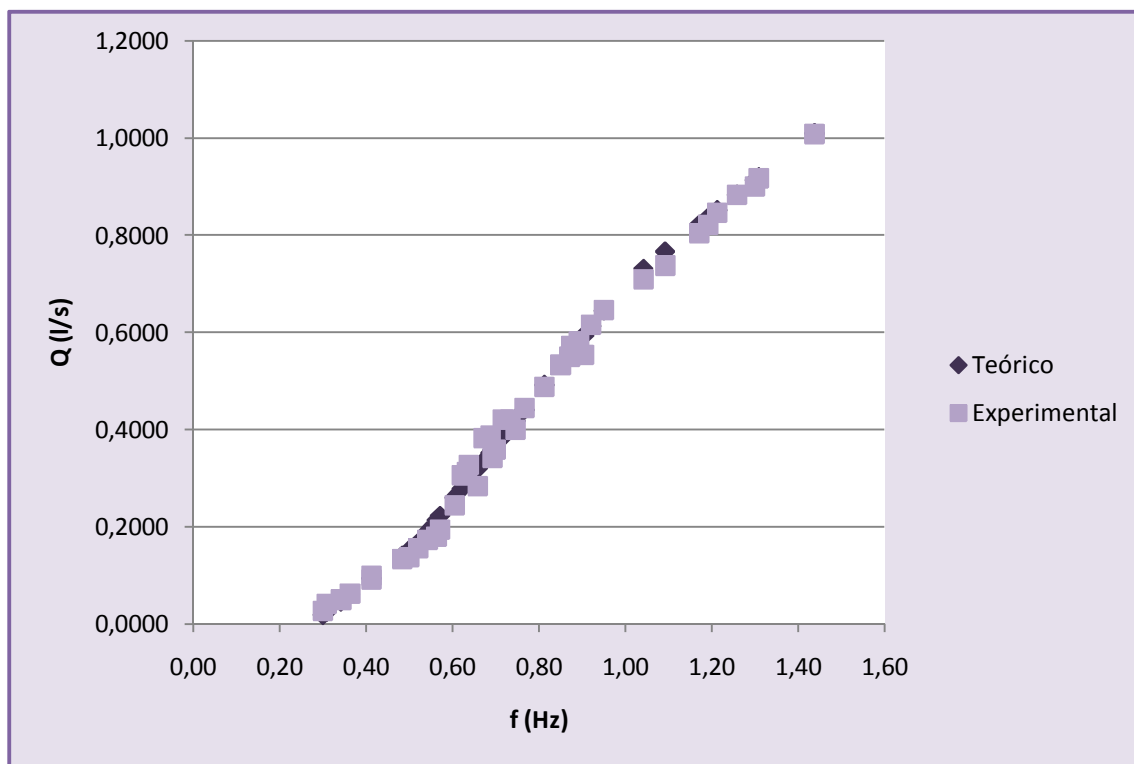


Figura 54. Comparación entre el caudal teórico y el experimental corregido

4.3. RELACIÓN DE TRANSMISIÓN

A lo largo de todo el proyecto se han establecido valores con diferentes relaciones de transmisión, pudiéndose así relacionar diversos datos y poder aceptar algunas hipótesis como verdaderas.

A continuación, se establece la relación entre el motor y la rueda motriz, ambos elementos fundamentales para poder extraer agua.

En este caso se establece el giro del motor tanto para los datos en los que se han realizado las medidas a altura constante como los que se han realizado variando la altura:

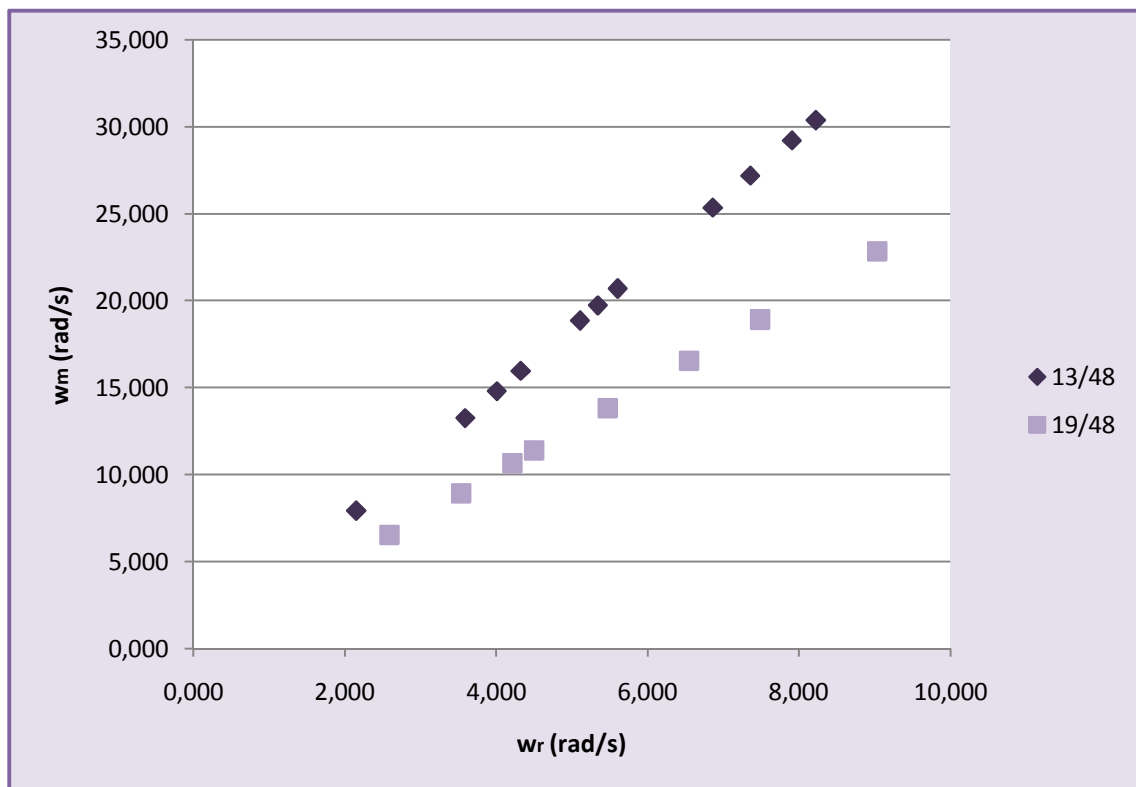


Figura 55. Giro del motor (altura constante)

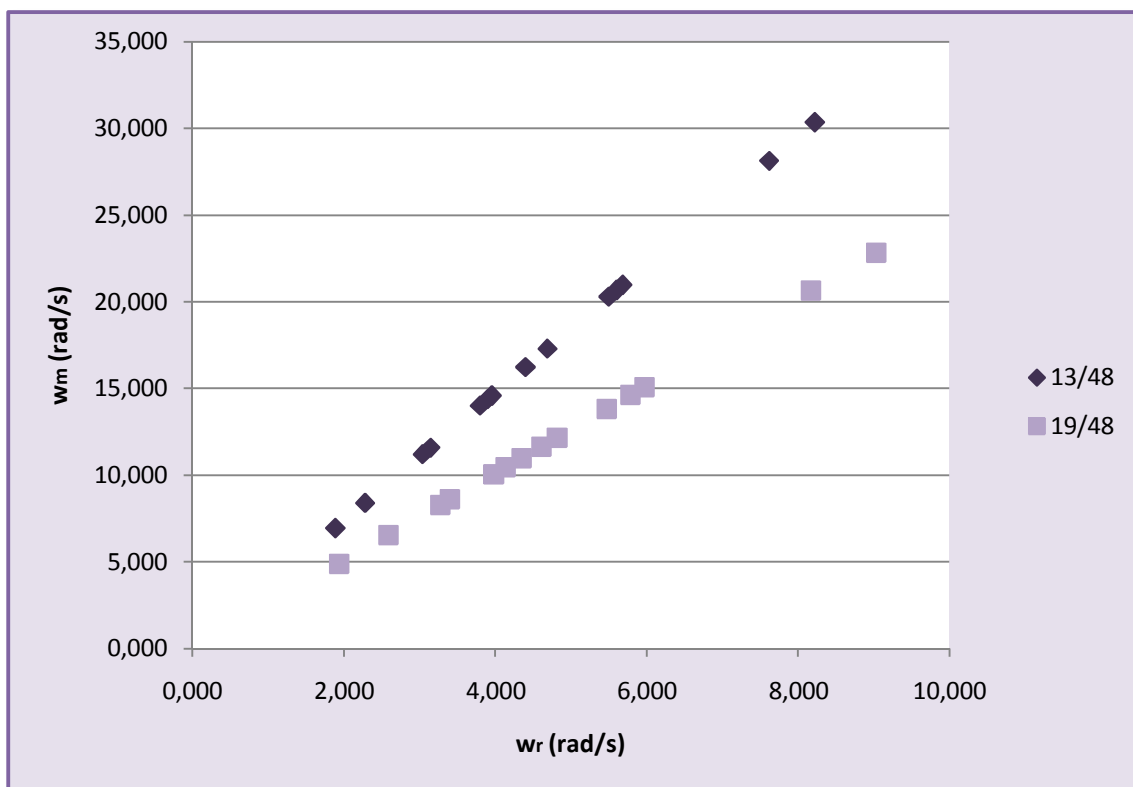


Figura 56. Giro del motor (diferentes alturas)

En las anteriores gráficas, se muestra como la velocidad de rotación del motor, para la misma velocidad de la rueda, es mayor con una relación de transmisión de 13/48.

4.4. POTENCIAS DE TRABAJO

En este apartado se calculan las distintas potencias que aparecen en la configuración motorizada de la bomba de mecate para poder extraer agua.

$$W_{el\acute{e}ctrica} \rightarrow W_{mec\acute{a}nica} \rightarrow W_{rueda} \rightarrow W_{\acute{u}til} \quad (42)$$

A continuación se muestran los parámetros de potencia distinguiéndose los datos obtenidos sin freno y los obtenidos con freno.

❖ *Potencias a alturas constantes de 4,2m*

En esta sección se calcularon las potencias que aparecen en la configuración de bomba de mecate motorizada manteniendo la altura constante pero variando durante los ensayos la corriente eléctrica que se suministraba al motor y desde el motor a la bomba de mecate. Además, se realizaron los experimentos cambiando la relación de transmisión, por lo que, se pudo obtener resultados muy variados y enriquecedores.

Para el cálculo de las diferentes potencias se utilizaron las ecuaciones (22), (23) y (24).

A continuación se va a proceder a mostrar una serie de gráficas en las que se representa la potencia del sistema, basadas en los resultados que se recogen en el *Anexo VIII.C. Potencias de* .

En primer lugar, se comparó la potencia eléctrica que era suministrada al motor, la cual iba aumentando en cada prueba, con la frecuencia que se obtenía en la rueda motriz de la bomba. Como se puede apreciar en la gráfica siguiente se observa que a medida que aumentaba la potencia

eléctrica las revoluciones de la rueda motriz aumentaban para un período de tiempo determinado:

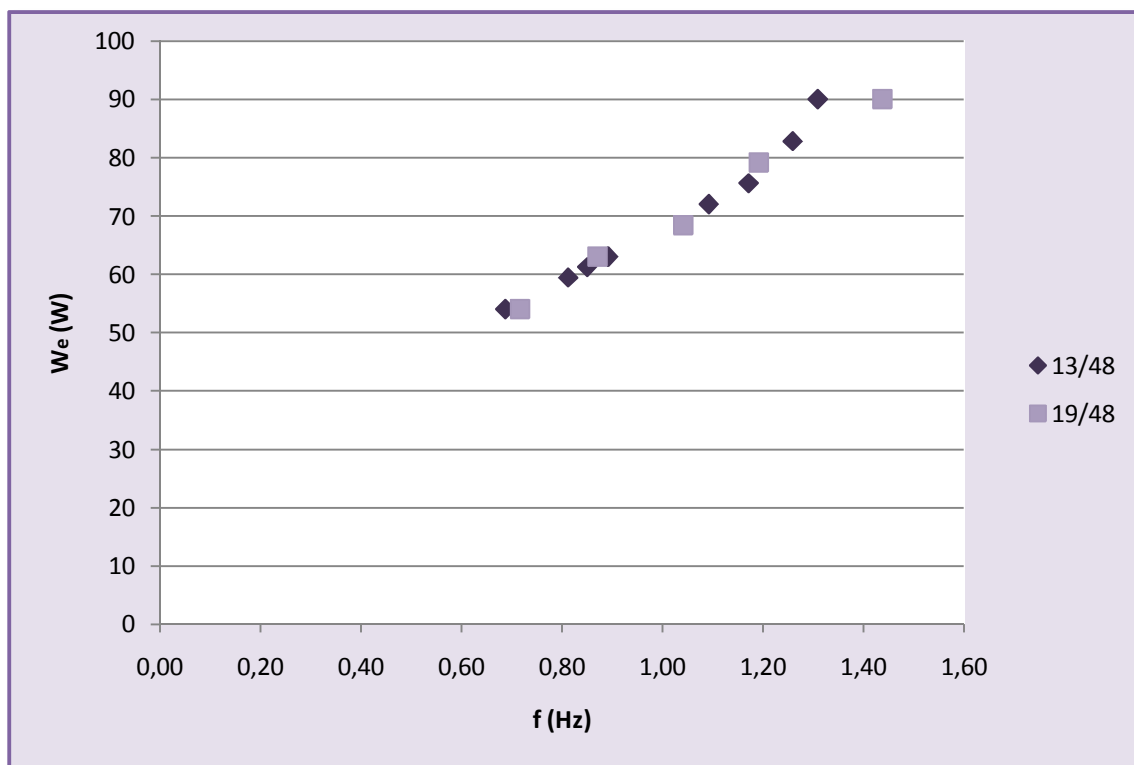


Figura 57. Potencia eléctrica frente a frecuencia (altura constante)

Una vez calculada la potencia eléctrica se procedió a calcular la potencia mecánica, gracias a una relación que se pudo extraer de la hoja de características del motor mostrada en el *Anexo II. Hoja de características del motor eléctrico*. La hoja de características mostraba una relación lineal entre la potencia de trabajo del motor y la potencia eléctrica:

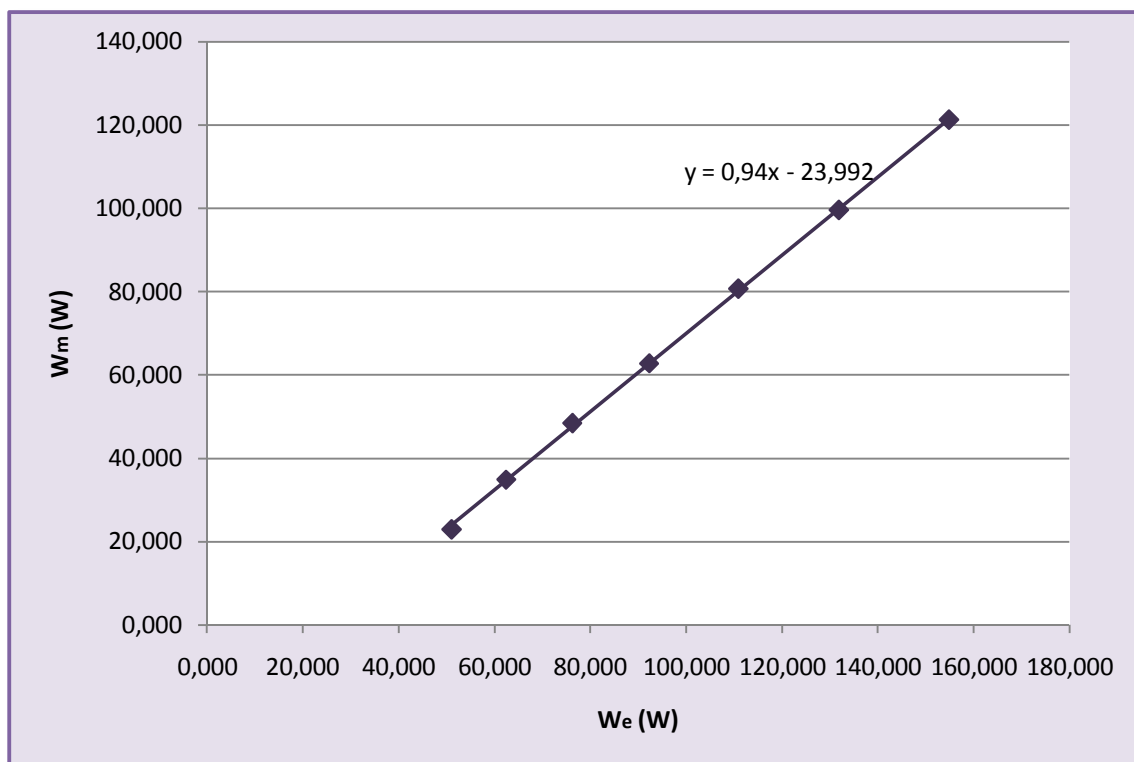


Figura 58. Relación entre la potencia mecánica del motor y la potencia eléctrica

En la gráfica de la Figura 58 se pudo obtener la ecuación que relacionaba la potencia eléctrica con la potencia mecánica, debiéndose acotar esta ecuación en los siguientes valores:

$$\text{Si } 50 < W_e < 155W \rightarrow W_m = 0,94W_e - 23,992 \quad (43)$$

Por tanto, conociendo la ecuación que relacionaba estas dos potencias, se calculó la potencia que el motor entregaba a la rueda. En los gráficos que se muestra se puede observar como dicha potencia aumenta a medida que aumentaba la potencia eléctrica al igual que la frecuencia, puesto que, ambos parámetros están ampliamente relacionados:

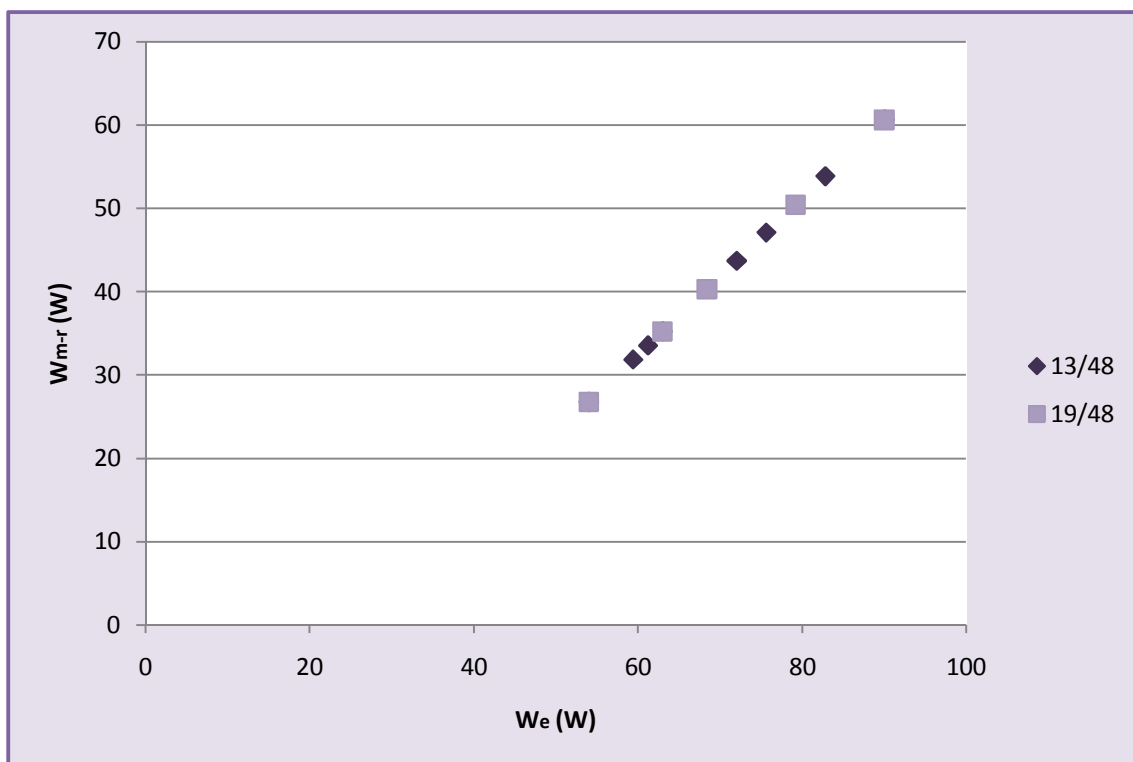


Figura 59. Potencia motor frente a potencia eléctrica (altura constante)

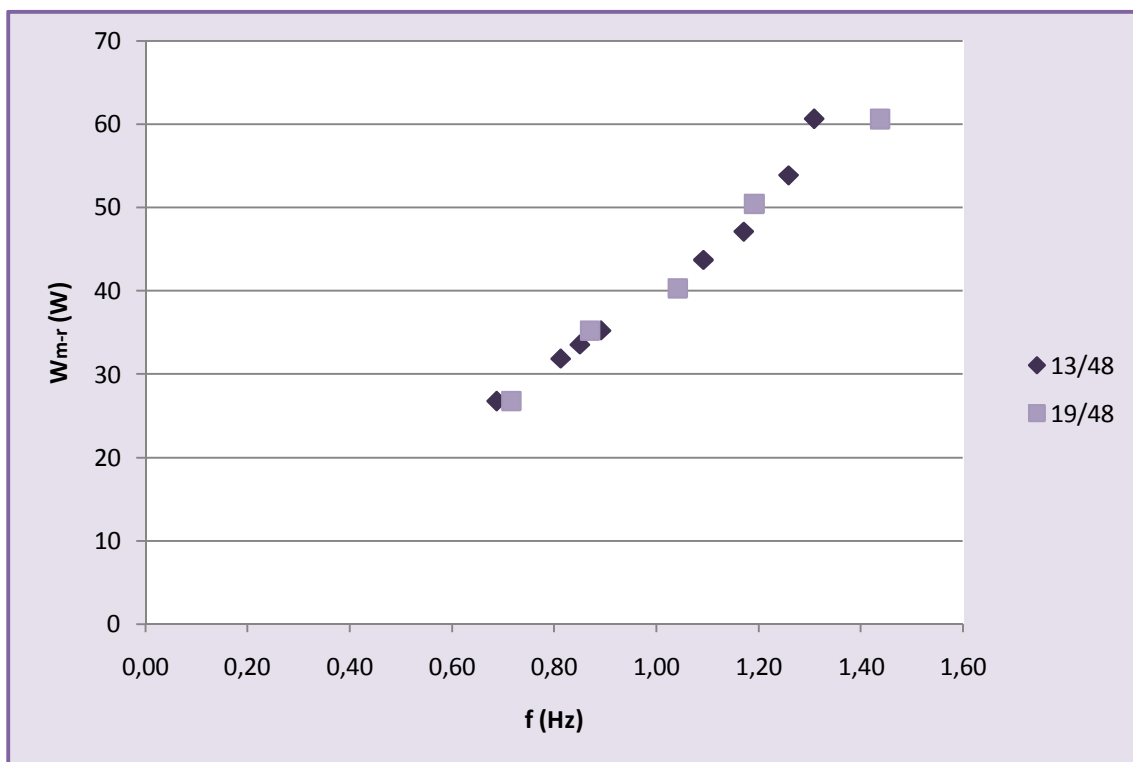


Figura 60. Potencia motor-rueda frente a frecuencia (altura constante)

Por último, se recoge la gráfica que muestra la potencia útil que se le suministraba al sistema para poder extraer agua:

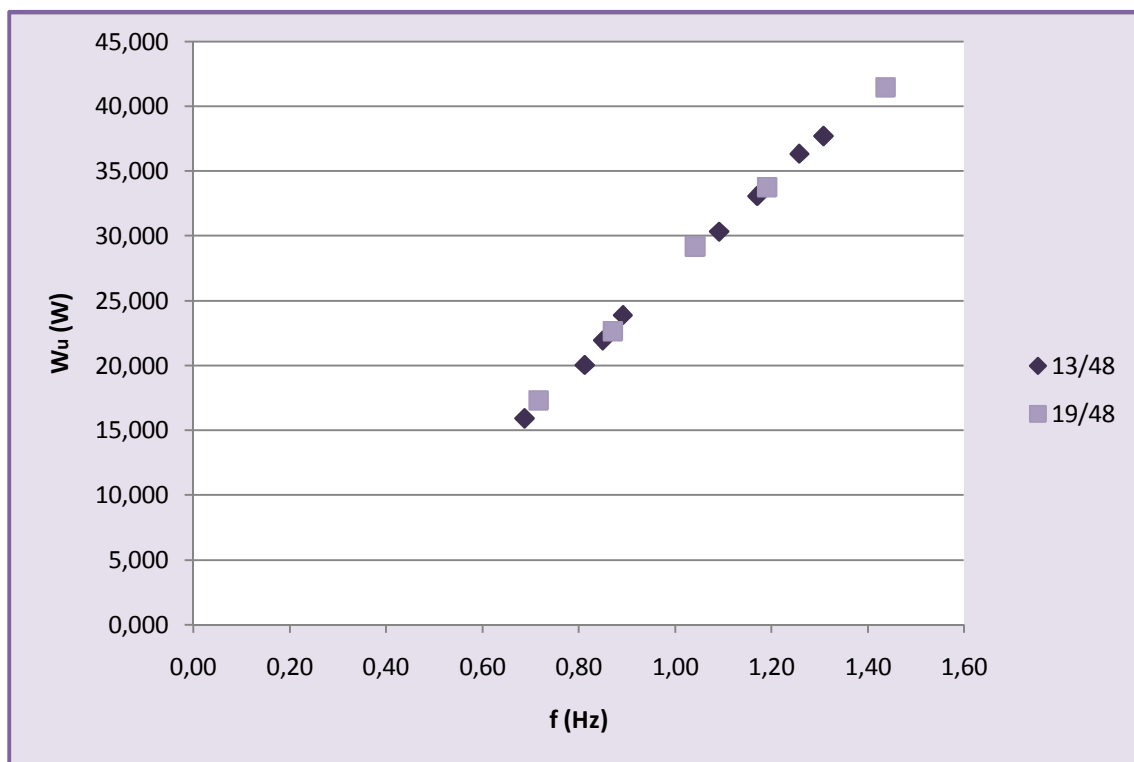


Figura 61. Potencia útil frente a frecuencia (altura constante)

❖ Potencias a diferentes alturas

A continuación, se procedió a analizar el comportamiento de los parámetros de potencia que aparecen en la configuración motorizada pero simulando diferentes alturas, en cada uno de los experimentos.

En un primer lugar, se establece la potencia eléctrica que se suministró para cada altura. Como se puede apreciar a la altura que se encontraba la instalación (4,2 metros) no se tomó el dato a potencia eléctrica 117W, ya que a esa potencia sin la utilización del sistema de frenado, se producía el desbordamiento de agua en el barreño acumulador, ya que el contador del caudal utilizado, para contabilizar el volumen de agua desalojada,

presentaba una reducción de diámetro, lo que provocaba el problema de desbordamiento.

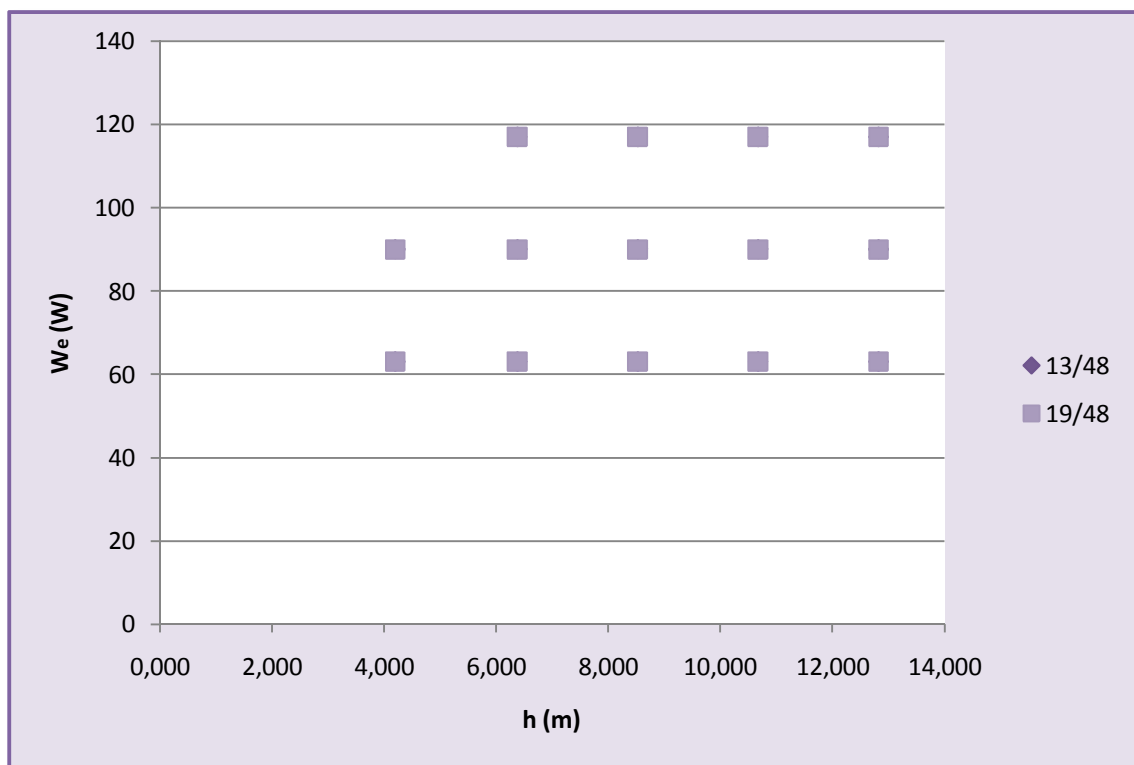


Figura 62. Potencia eléctrica frente altura

Una vez conocida las tres variables de potencia eléctrica suministradas al motor para cada altura, se pudo calcular la potencia mecánica que el motor suministraría a la rueda o polea motriz de la bomba de mecate y la potencia establecida finalmente en la bomba para cada altura considerada, estando la potencia mecánica suministrada a la rueda motriz recogida en la siguiente gráfica:

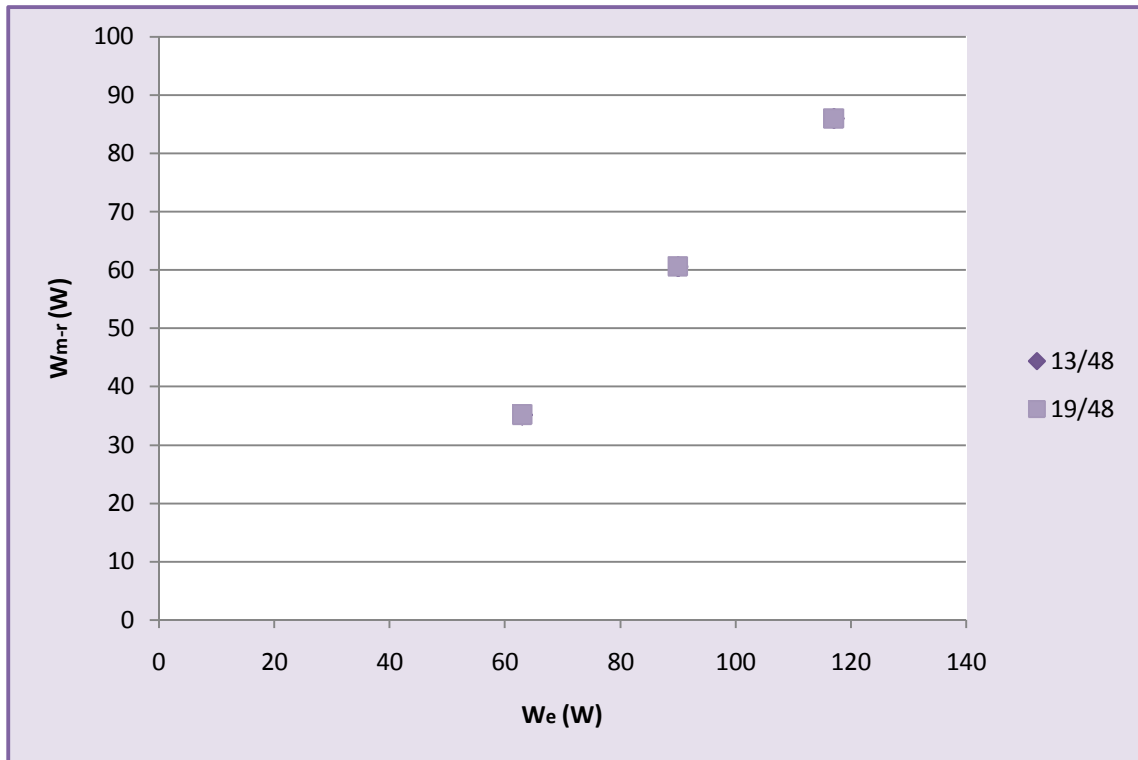


Figura 63. Potencia motor-rueda frente a potencia eléctrica (diferentes alturas)

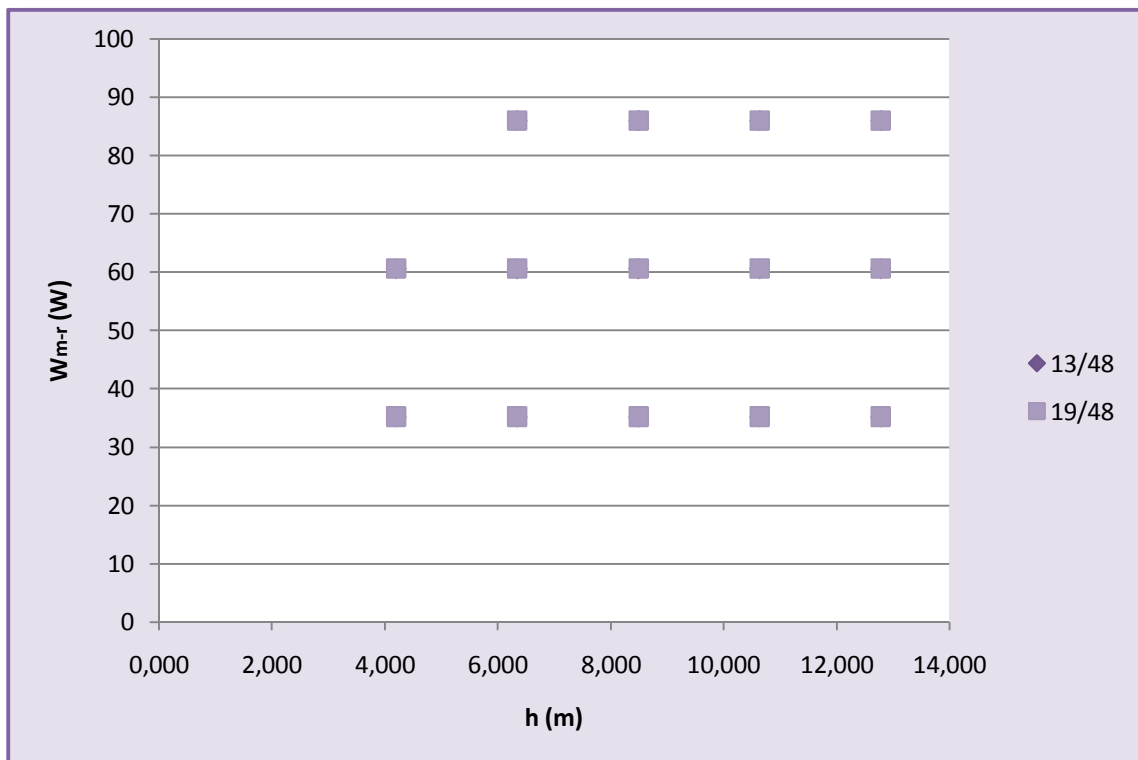


Figura 64. Potencia motor-rueda frente a altura

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Por último, se obtuvo la relación de la potencia que se necesitó para extraer agua con respecto a la altura:

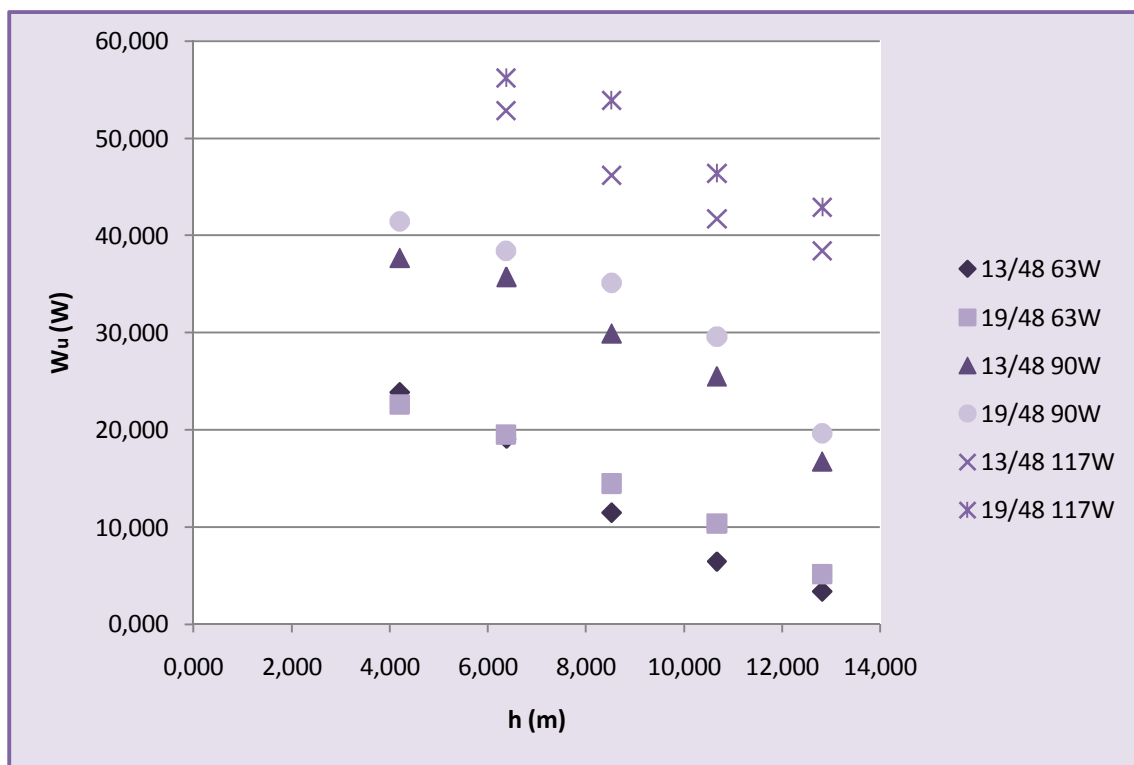


Figura 65. Potencia útil frente a altura

Esta última gráfica mostrada en la Figura 65 es muy representativa puesto que, se puede establecer con total seguridad que la potencia del trabajo necesaria para extraer agua disminuye con la altura puesto que, a mayor altura el sistema extraía menor cantidad de agua, disminuyendo el trabajo realizado.

Esto contrarresta con los resultados que se obtuvieron con la bicicleta y con la manivela, los cuales están representados en el *Anexo IV. Toma de datos bomba de mecate manual* y en el *Anexo V. Toma de datos de bici-bomba de mecate*, obtenidos por Manuel Patrón en el proyecto "Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate". También hay que destacar que los datos que se tomaron con bicicleta fueron a frecuencia no constante, es decir, las repeticiones para un tiempo determinado se establecieron en función del

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

cansancio físico de la persona, no estableciéndose en valores fijos para cada pulso de tiempo.

A continuación, se observa como el trabajo útil aumenta con la frecuencia, al igual como se podía observar en los valores que se realizaron sin freno:

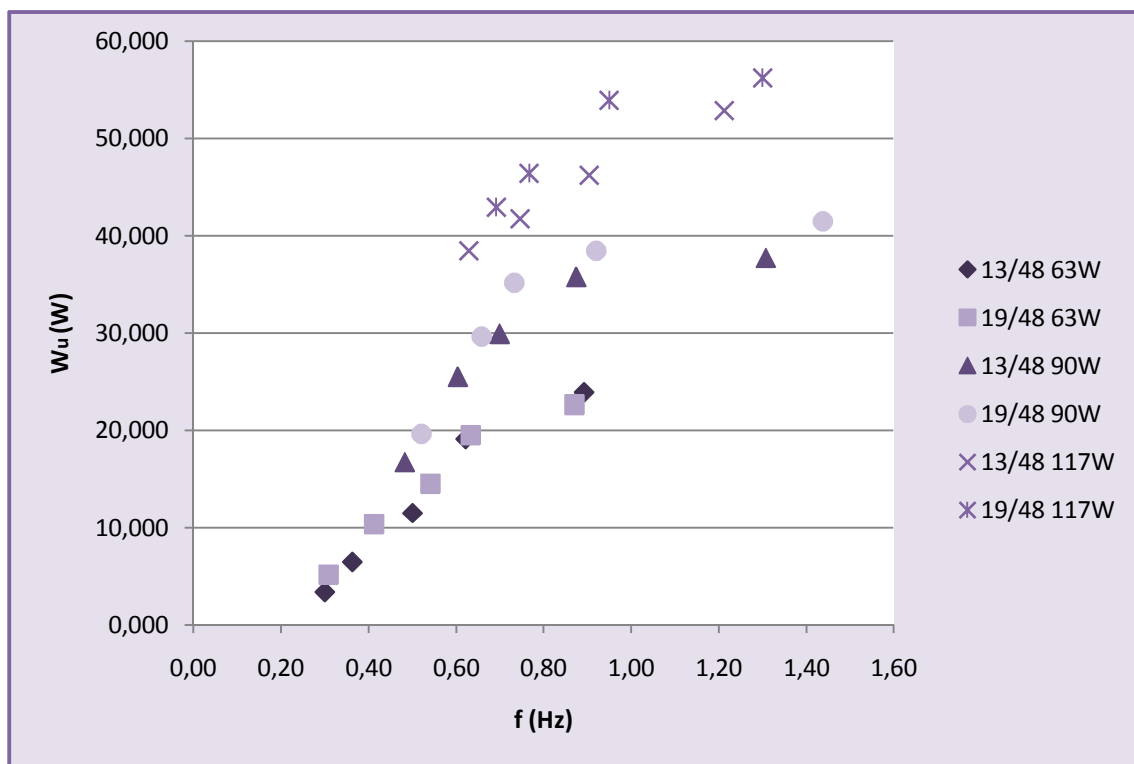


Figura 66. Potencia útil frente a frecuencia (diferentes alturas)



4.5. RENDIMIENTOS

En este apartado, al igual que en el anterior se establecieron las potencias de trabajo de la bomba de mecate, en éste se analizarán los rendimientos presentes debido a los diferentes parámetros que actuaban durante el funcionamiento u extracción de agua en la bomba de mecate. Los rendimientos que se analizaron fueron:

1. Rendimiento volumétrico: Se establece como el rendimiento que analiza la eficiencia del sistema durante la extracción de agua.
2. Rendimiento mecánico: Se establece como el rendimiento que analiza las diferentes fuerzas que aparecen en la bomba de mecate.
3. Rendimiento de la bomba de mecate: Se establece como el rendimiento que analiza la eficiencia de la configuración global de la bomba de mecate motorizada.

A continuación se muestran los rendimientos distinguiéndose los datos obtenidos sin freno y los obtenidos con freno.

❖ *Rendimientos a alturas constantes de 4,2m*

En esta sección se calcularán los rendimientos que aparecen en la configuración de bomba de mecate motorizada manteniendo la altura constante, pero suministrando diferentes potencias mecánicas al sistema. Además, se realizaron los experimentos cambiando la relación de transmisión, por lo que, se pudo obtener resultados muy variados y clarividentes conclusiones.

Para el cálculo de los rendimientos se utilizaron las ecuaciones (25), (26) y (27), definidas en el capítulo teórico.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

A continuación se va a proceder a mostrar una serie de gráficas en las que se representan los rendimientos definidos, basadas en los resultados que se recogen en el *Anexo VIII.D. Rendimientos*.

En primer lugar, se comparó el rendimiento volumétrico con la frecuencia que se obtenía en cada prueba. En la figura se aprecia una clara ascensión del rendimiento con la frecuencia, siendo máximo a altas frecuencias, puesto que a altas velocidades de subida de los pistones por la tubería, los valores del caudal de pérdidas son prácticamente nulos. La gráfica que representa esto fue:

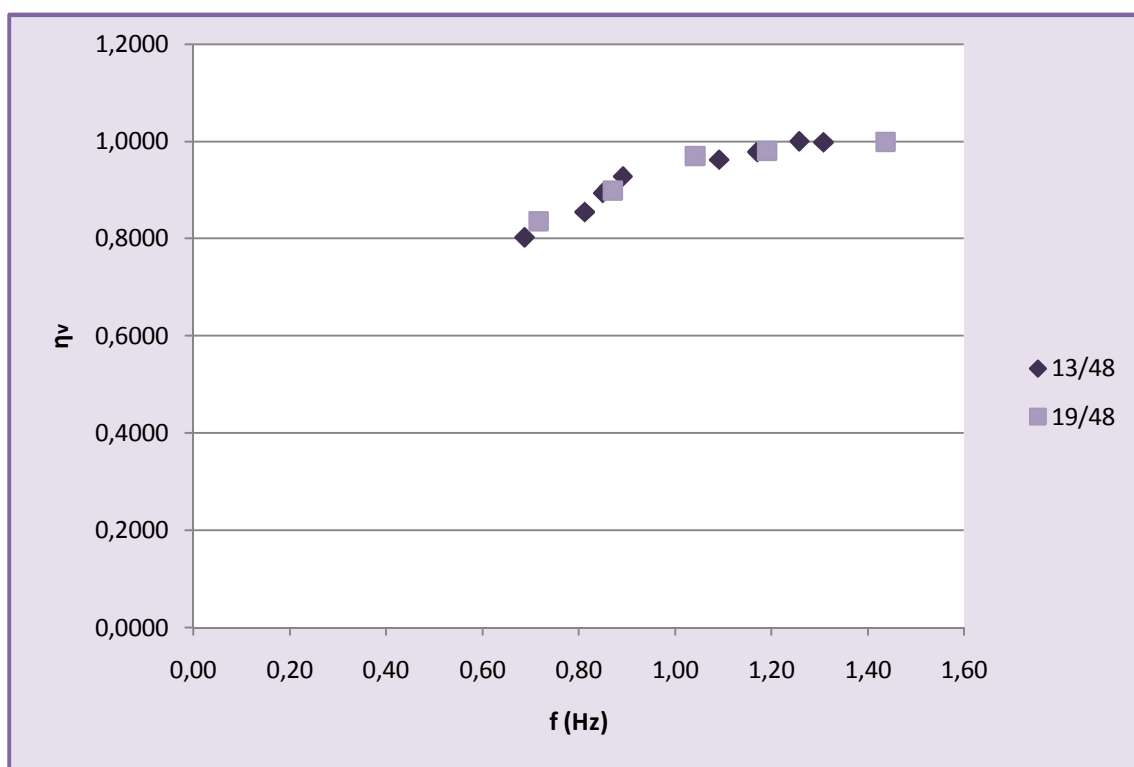


Figura 67. Rendimiento volumétrico frente a frecuencia (altura constante)

Una vez conocido el rendimiento volumétrico se representó el rendimiento mecánico que aparecía en la bomba de mecate durante la extracción de agua frente a la frecuencia. Al contrario que el rendimiento volumétrico, el rendimiento mecánico disminuía ligeramente con la frecuencia puesto que, como se explicará en el siguiente epígrafe las fuerzas presentes en la

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

instalación aumentaban con la velocidad de ascenso de los pistones, explicándose que a mayores velocidades la tensión de la cuerda aumentaba. La siguiente imagen muestra la gráfica del rendimiento:

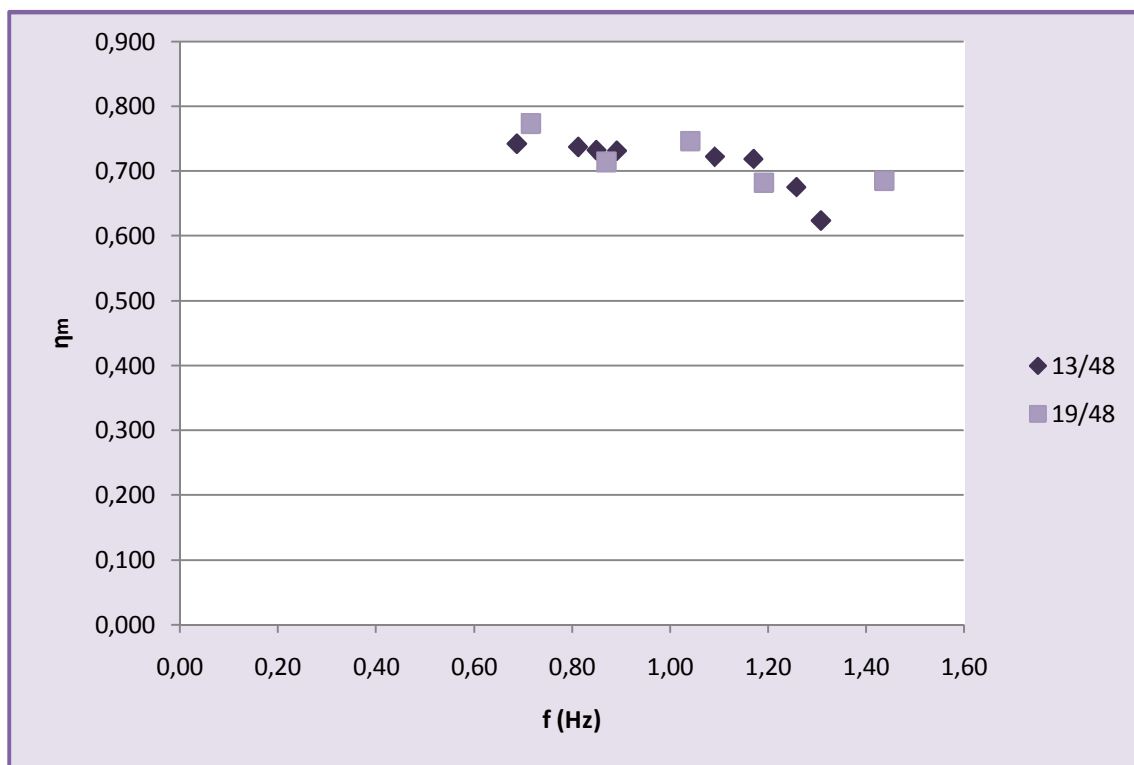


Figura 68. Rendimientos mecánico frente a frecuencia (altura constante)

Por último, se estableció el rendimiento de la bomba de mecate, en función de los rendimientos anteriores:

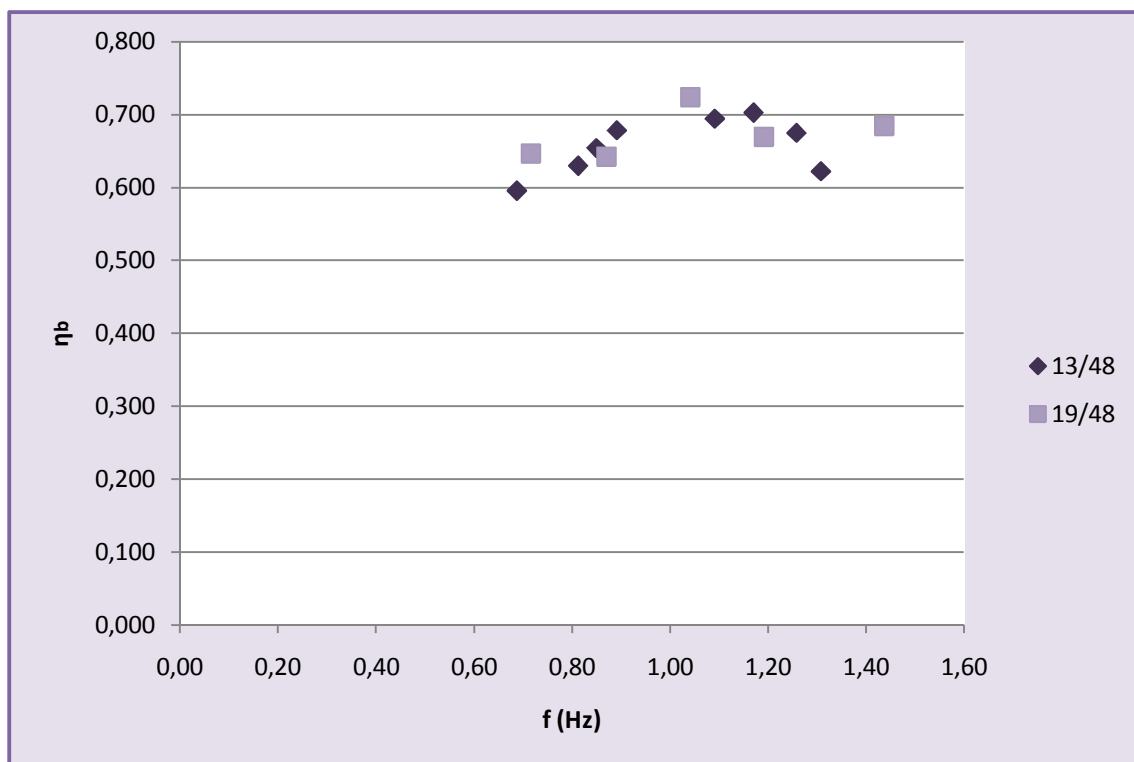


Figura 69. Rendimiento bomba de mecate frente a frecuencia (altura constante)

El rendimiento máximo de la bomba de mecate fue de 0,724 para una frecuencia de aproximadamente 1 Hz.

❖ Rendimientos a diferentes alturas

A continuación, se procedió a analizar el comportamiento de los rendimientos que aparecen en la bomba de mecate cuando se instala la configuración motorizada pero simulando los distintos experimentos a diferentes alturas. En estos apartados se puede observar el comportamiento a un rango de frecuencias superior que en la anterior toma de datos.

Como en los experimentos a la misma altura, en los datos tomados con freno también se analizó en primer lugar el rendimiento volumétrico. En este caso también se producía un aumento del rendimiento a medida que la frecuencia

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

era mayor, siendo máximo para valores mayores de 1 Hz, siendo aproximadamente igual a la unidad.

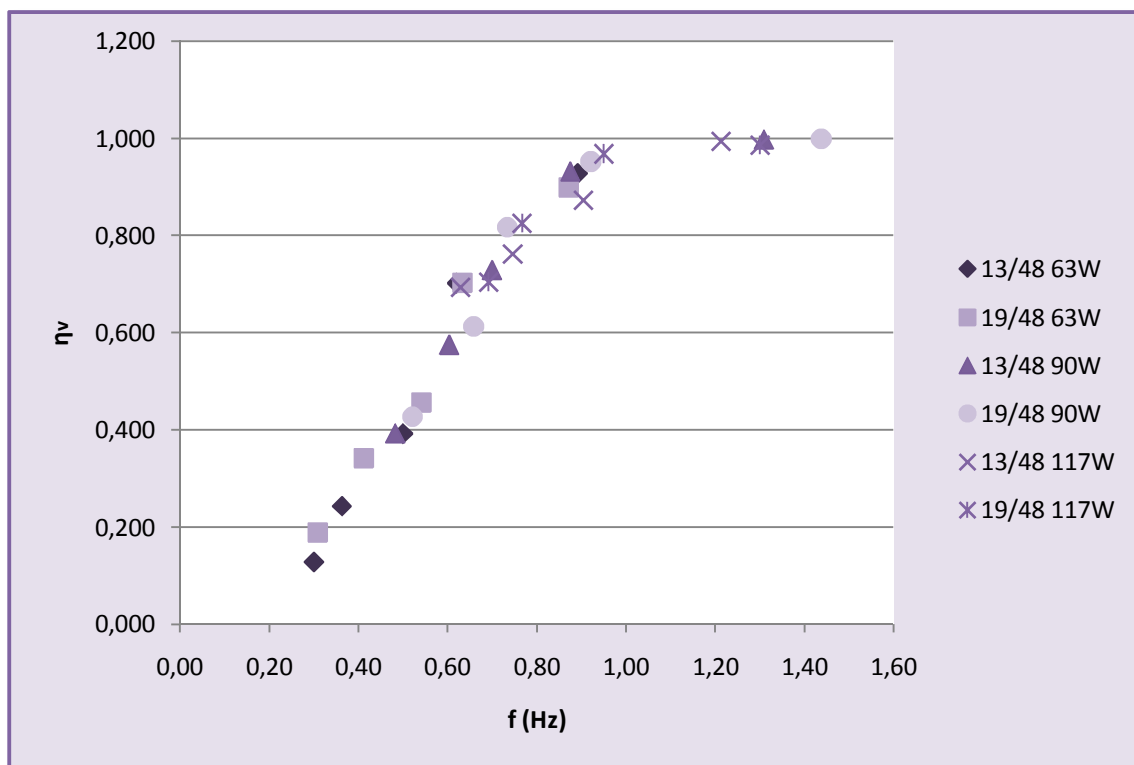


Figura 70. Rendimiento volumétrico frente a frecuencia (diferentes alturas)

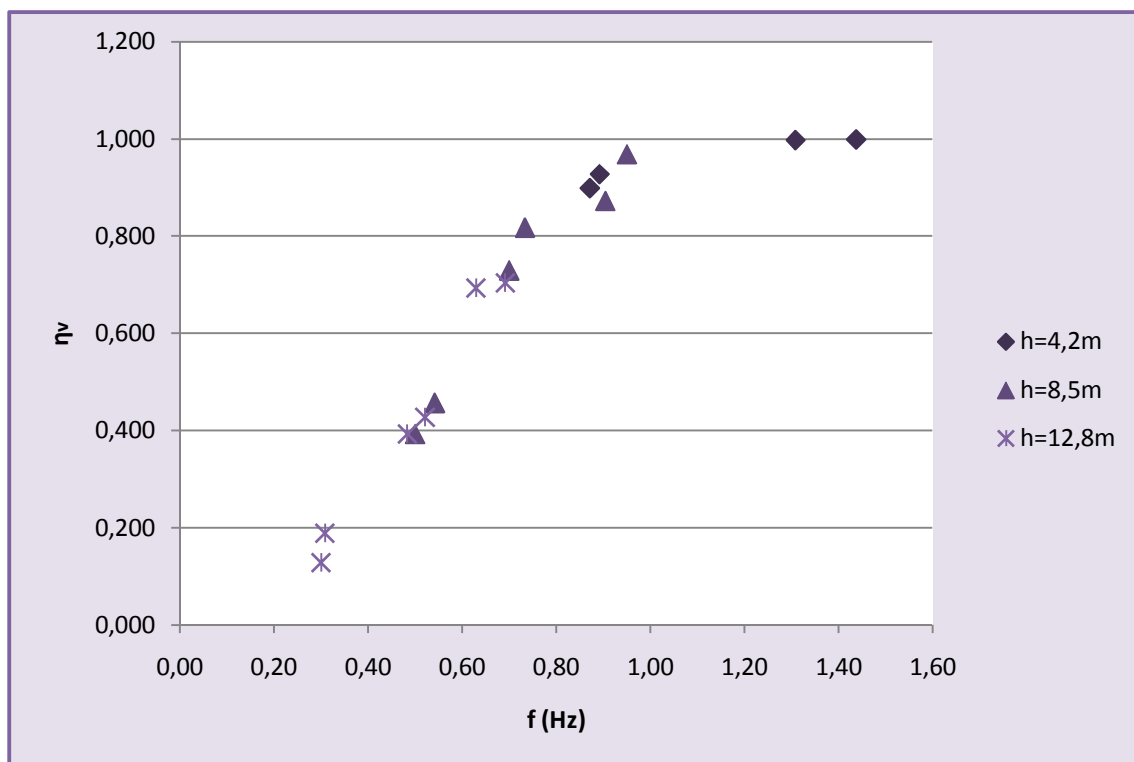


Figura 71. Rendimiento volumétrico frente a frecuencia (altura constante)

También se comprobó el comportamiento del rendimiento volumétrico frente a la altura. Para ello, se fijó la frecuencia, observando el comportamiento que iba a sufrir este parámetro frente a distintas alturas, es por ello como en la gráfica mostrada en la Figura 72, se puede observar como el rendimiento volumétrico es constante a varias alturas (4,2, 6,4, 8,5, 10,7 y 12,8 metros), siempre y cuando se mantenga la misma frecuencia, en este caso se representaron puntos con frecuencias similares con un error en cada una de ellas de $\pm 0,05\text{Hz}$ ($0,50 \pm 0,05\text{ Hz}$, $0,65 \pm 0,05\text{ Hz}$ y $0,90 \pm 0,05\text{ Hz}$).

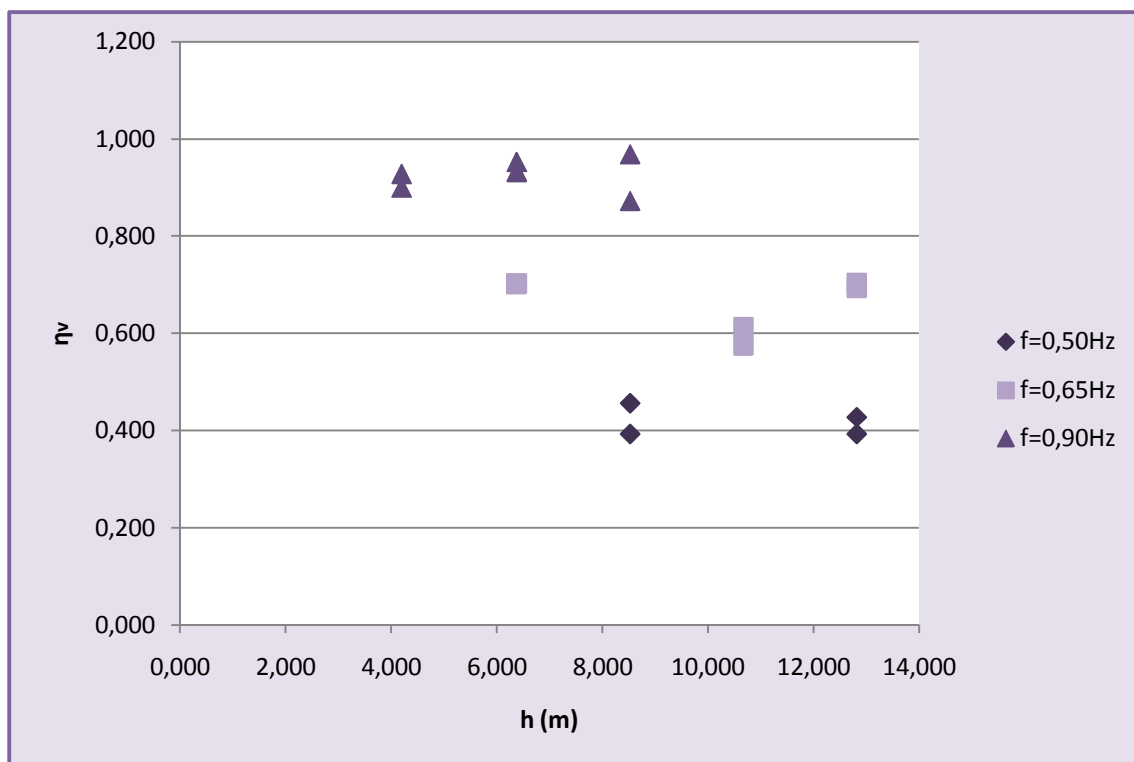


Figura 72. Rendimiento volumétrico frente altura (frecuencia constante)

Esta última gráfica, permite establecer con total seguridad que el rendimiento volumétrico dependía exclusivamente de la frecuencia, siendo independiente de la altura a la que se encontraba la instalación.

Una vez conocido el rendimiento volumétrico se representó el rendimiento mecánico presente en la bomba de mecate durante la extracción de agua frente a la frecuencia. En este caso, se puede apreciar una disminución de los valores del rendimiento a medida que aumenta la frecuencia, en la Figura 73 y Figura 74 se aprecia claramente el efecto, produciéndose una ligera disminución para diferentes alturas fijas.

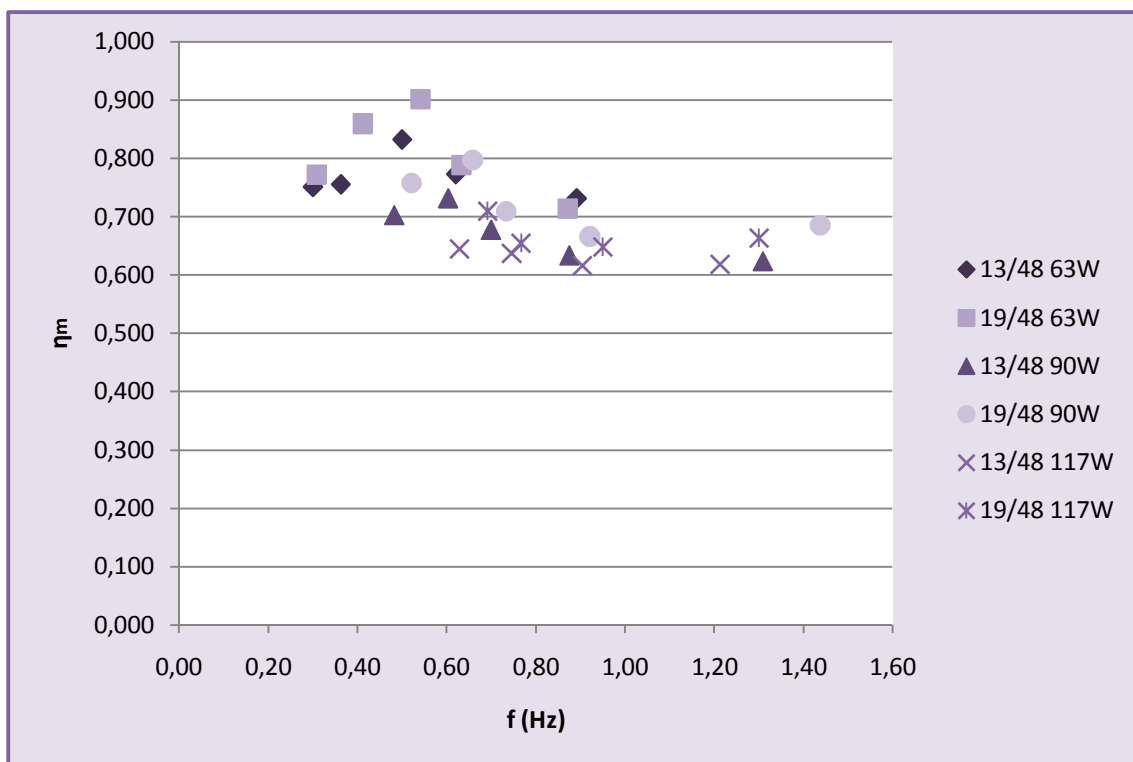


Figura 73. Rendimiento mecánico frente a frecuencia (diferentes alturas)

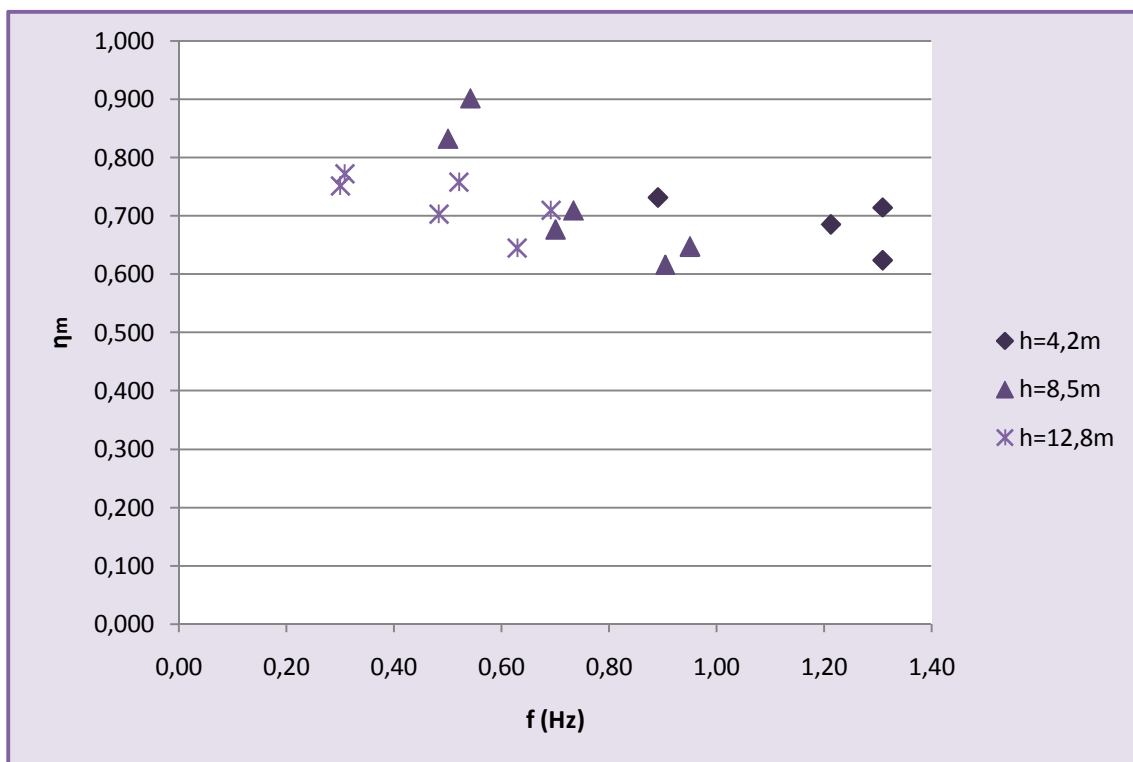


Figura 74. Rendimiento mecánico frente a frecuencia (altura constante)

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Mientras que en la Figura 75, se presentó el rendimiento mecánico frente a la altura a frecuencias constante ($0,50 \pm 0,05$ Hz, $0,65 \pm 0,05$ Hz y $0,90 \pm 0,05$ Hz), observándose como éste decrece ligeramente a medida que aumenta la altura (4,2, 6,4, 8,5, 10,7 y 12,8 metros).

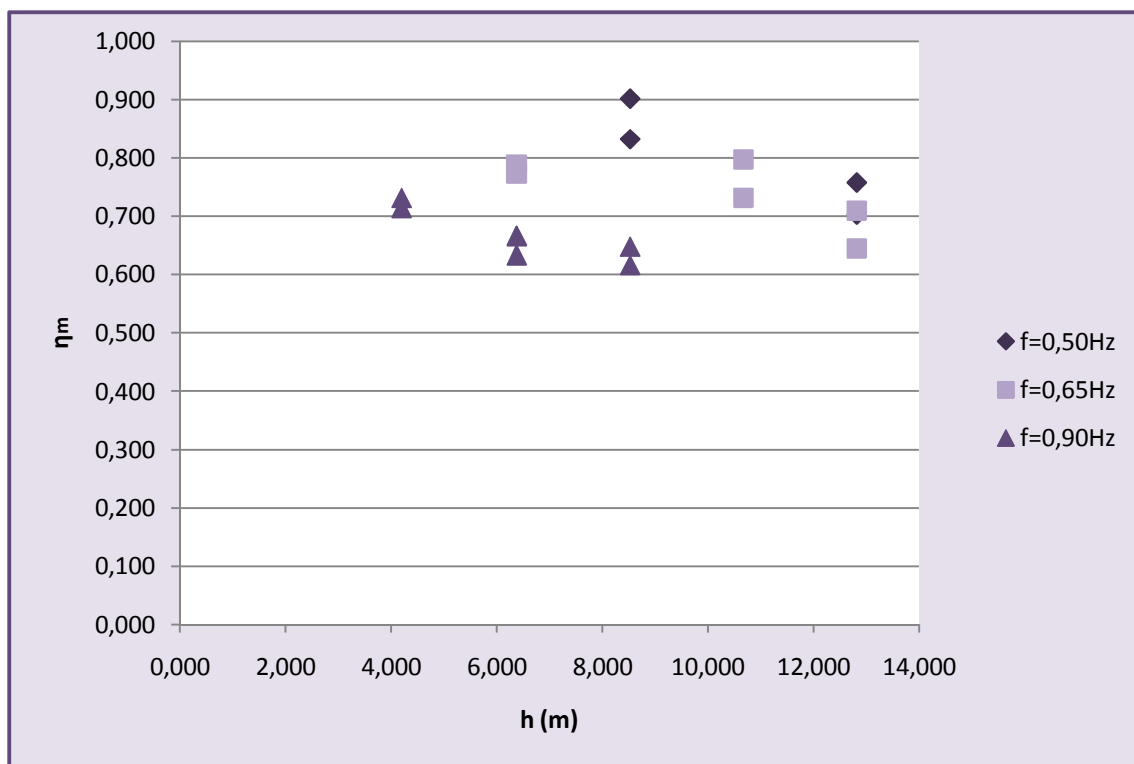


Figura 75. Rendimiento mecánico frente altura (frecuencia constante)

Por lo que, se establece que el rendimiento mecánico depende de dos efectos ligeramente, por un lado disminuye al aumentar la frecuencia con la que se trabaja en la instalación y, por otro, disminuye ligeramente al aumentar la altura, dependiendo por tanto de ambos parámetros.

Por último, se estableció el rendimiento de la bomba de mecate, en función de los rendimientos anteriores, pudiéndose conocer que el rendimiento ascendería frente a la frecuencia, descendiendo ligeramente con la altura:

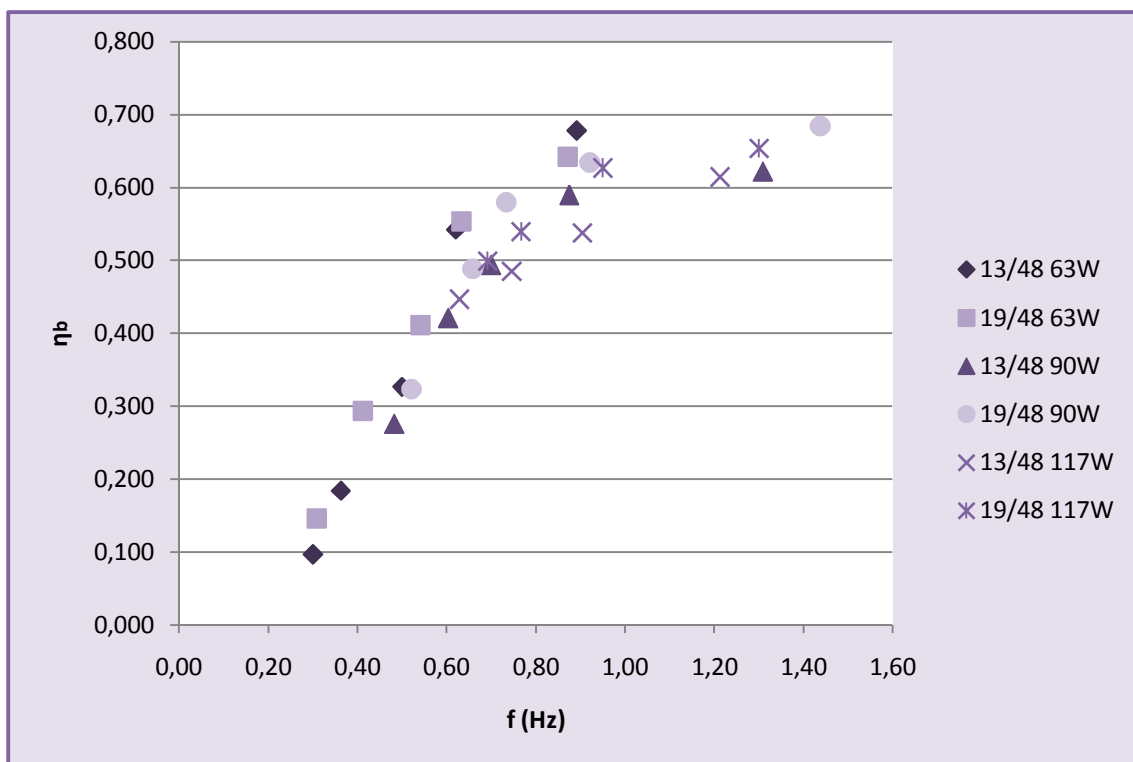


Figura 76. Rendimiento bomba de mecate frente a frecuencia (diferentes alturas)

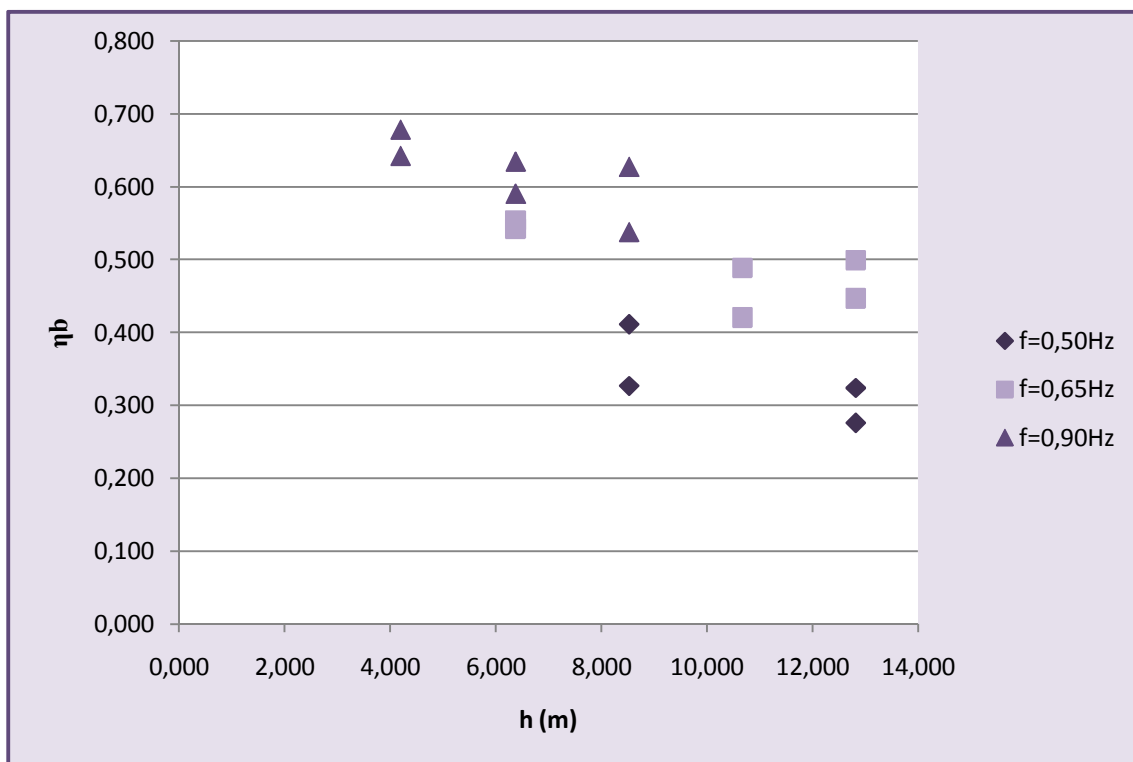


Figura 77. Rendimiento de bomba de mecate frente altura (frecuencia constante)



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

El rendimiento máximo de la bomba de mecate fue de 68,4% para una altura de 4,2 metros. Como se puede apreciar en la Figura 77 el rendimiento de la bomba disminuye con la altura a la que se encuentra la instalación.



4.6. FUERZA DE ROZAMIENTO

La fuerza de rozamiento del sistema es esencial para comprender la instalación y caracterizar la bomba. En las anteriores memorias se había obtenido algún resultado esclarecedor de este dato, por lo que, se ha continuado investigando este parámetro con el objetivo de conocer la relación que posee con otros valores importantes para el funcionamiento eficiente de la instalación estudiada.

En la bomba de mecate motorizada existirán distintas fuerzas de rozamiento, procedentes de la configuración motorizada, como podían ser las que se obtenían con el sistema de transmisión. Aun así, el estudio se centrará en las fuerzas de rozamiento que presentaba la instalación en sí, es decir, sólo la bomba de mecate.

En primer lugar, se recuerdan las distintas fuerzas de rozamiento que existen en la bomba de mecate:

- Fuerza de rozamiento entre los cojinetes-eje
- Fuerza de rozamiento entre caja guía (botella)-cuerda
- Fuerza de rozamiento pistones-tubería

Las dos primeras fuerzas varían con la tensión de la cuerda, mientras que la tercera varía con la altura. Por lo que, los parámetros que influyen en la fuerza de rozamiento se consideran que son:

- Tensión de la cuerda
- Altura (masa del dinamómetro)

Anteriormente con las distintas configuraciones de la bomba de mecate era muy difícil obtener una expresión matemática que cuantificara el valor teórico

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

del par de rozamiento, obteniéndose valores experimentalmente cuando el sistema se encontraba en reposo. Con la configuración motorizada se pudo resolver esta problemática y obtener una ecuación teórica para hallar la fuerza de rozamiento (expresión (30)).

Por lo que, se calculó las fuerzas de rozamiento que aparecieron en cada prueba realizada, los resultados pueden encontrarse en el *Anexo VIII.E. Fuerza de rozamiento*.

Como se dijo anteriormente los parámetros a considerar para que la fuerza de rozamiento de la instalación variara fueron la tensión de la cuerda y la altura, para evaluarlos por separado se realizaron unos experimentos a altura constante y otros simulando diferentes alturas.

❖ *Fuerza de rozamiento a altura constante de 4,2m*

Primero, se calculó la fuerza de arrastre que había que vencer en vacío, con el objetivo de conocer si durante el funcionamiento de la instalación está era considerable.

En el siguiente ensayo se obtuvieron diferentes valores de la fuerza de arrastre que había que vencer según se iban realizando diferentes pruebas, cada una de ellas a mayor potencia eléctrica.

Por lo que, cuando se finalizaba la captura de datos de una prueba durante un tiempo aproximado de cuatro minutos, se procedía a realizar el siguiente proceso:

1. Inicialmente se colocaba la manivela en posición horizontal, una vez colocado en esta posición se enganchaba una báscula digital donde se colgaba, a su vez, un cubo.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

2. Posteriormente se iba añadiendo agua de forma progresiva al cubo, parando este proceso cuando el peso del agua fuese suficiente para mover el sistema.
3. Finalmente se apuntaban los datos obtenidos tras varias repeticiones.



Figura 78. Cálculo de la fuerza de arrastre (Imágenes del Proyecto “Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate”)

A continuación, se establecen los datos numéricos en los que se basó el experimento y la gráfica obtenida, donde se muestra la fuerza de arrastre frente a la frecuencia:

PRUEBA INICIAL		
F (N)	W_e (W)	f (Hz)
6,468/4,998/5,684	0	0,00
PRIMERA PRUEBA		
F (N)	W_e (W)	f (Hz)
4,900/3,920	33,90	0,44
SEGUNDA PRUEBA		
F (N)	W_e (W)	f (Hz)
4,802/5,390	49,05	0,62
TERCERA PRUEBA		
F (N)	W_e (W)	f (Hz)
5,684/4,116	63,46	0,83
CUARTA PRUEBA		
F (N)	W_e (W)	f (Hz)
7,644/5,684	90,00	1,19

Tabla 18. Resultados de la fuerza de arrastre para pruebas a distintas frecuencias

Como se puede apreciar en la Tabla 18 conforme se iban llevando a cabo las pruebas se iba aumentando la potencia en cada una de ellas produciéndose una fuerza de arrastre constante, pero si se observaba como había variado la tensión de la cuerda durante las pruebas, es decir, durante las pruebas la posición del nudo corredero de la cuerda había cambiado. En cada una de ellas se había llevado dicho nudo a la misma posición inicialmente, variando su posición dependiendo de la frecuencia a la que se trabajaba.

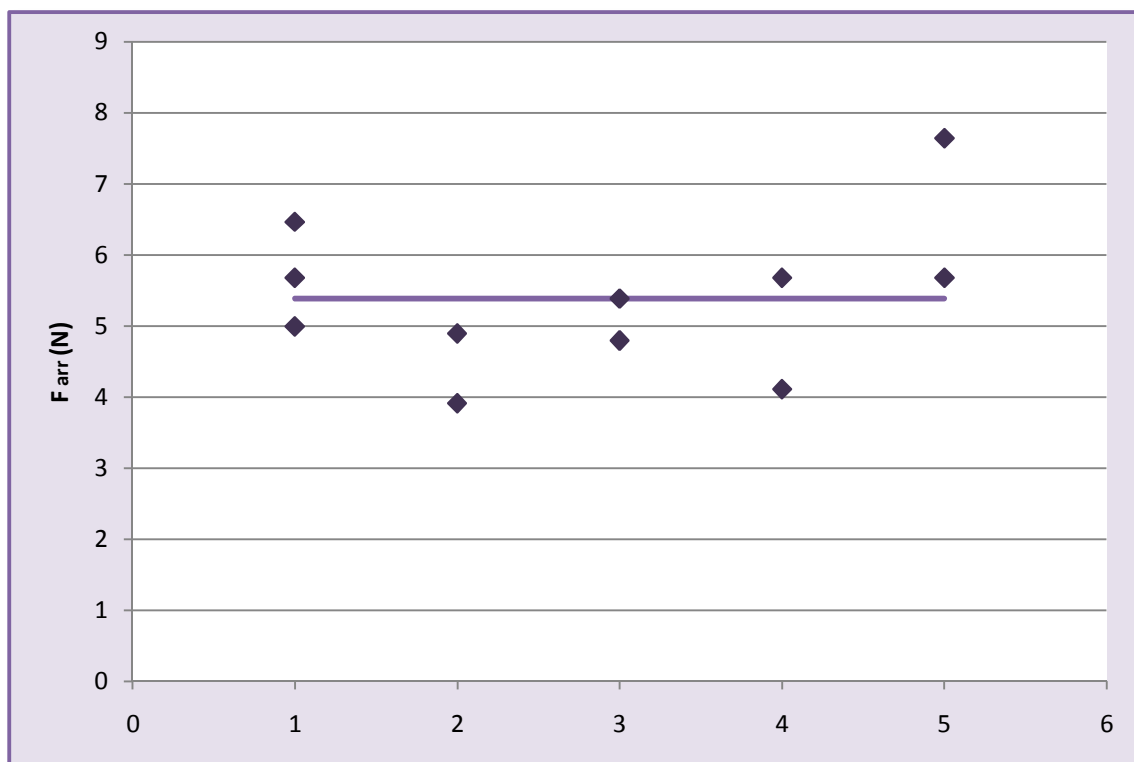


Figura 79. Fuerza de arrastre

Por lo que, se puede establecer como cuando la instalación se encuentra en vacío, la fuerza de arrastre será aproximadamente 5,39 N, no teniendo mucha importancia la variación de la tensión de la cuerda (± 10 cm) para calcular la fuerza que hay que vencer inicialmente en la instalación.

Una vez conocida la fuerza de arrastre, se evaluó y midió la fuerza de rozamiento cuando la instalación se encontraba funcionando. Observándose el efecto de aumento de la fuerza de rozamiento según se aumentaba la velocidad de la cuerda y pistones, manteniendo la altura constante, ya que durante estas pruebas no se utilizó el freno dinamométrico.

Por lo que, se representó una gráfica donde se podía comprobar la fuerza de rozamiento frente a la frecuencia, pudiéndose observar como la fuerza de rozamiento aumentaba conforme se producía un aumento de la velocidad de extracción del caudal de agua en la bomba de mecate.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Esto es debido a que a mayor velocidad la tensión de la cuerda aumenta, produciéndose mayores fuerzas de oposición al movimiento en la caja guía y en la rueda motriz, debido al aumento del rozamiento. Siendo el efecto de la tensión de la cuerda nulo para el cálculo de la fuerza de arrastre en vacío, pero siendo importante para el cálculo de la fuerza de rozamiento cuando se encontraba funcionando la instalación.

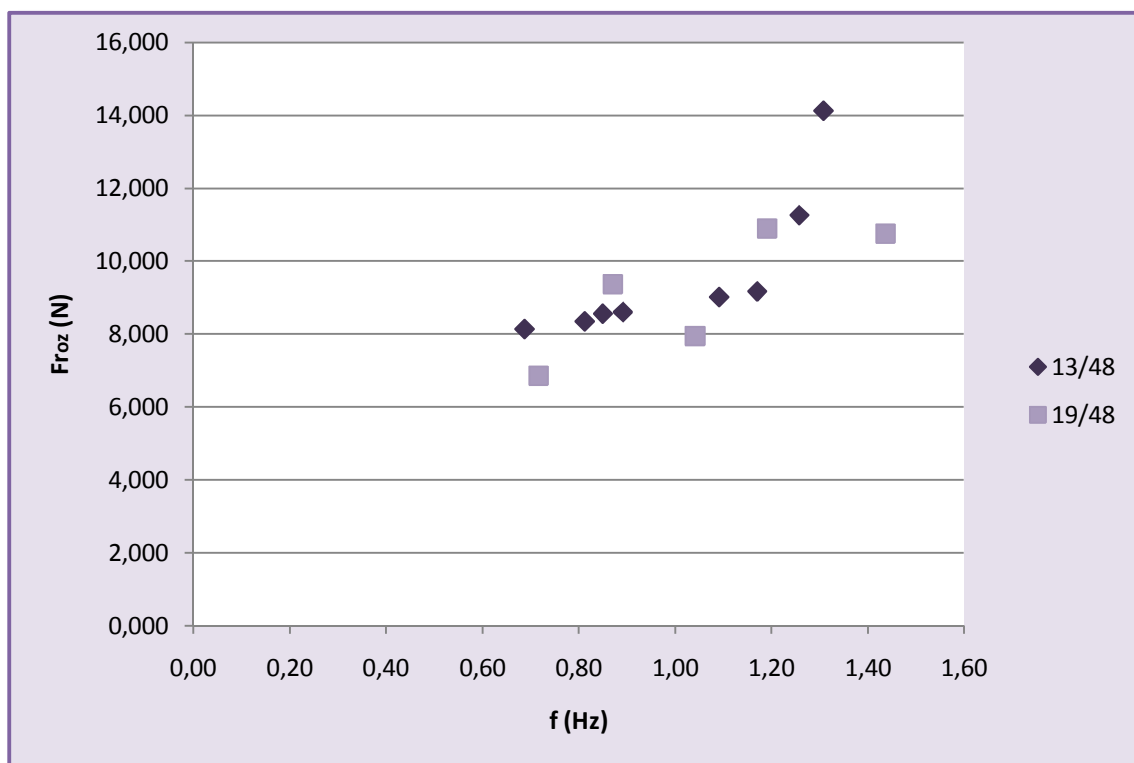


Figura 80. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia

En la gráfica anterior de la Figura 80, se puede definir que la fuerza de rozamiento es prácticamente igualitaria durante las dos configuraciones de transmisión de potencia, por lo que, se puede establecer que esta fuerza de rozamiento es correcta, siendo la que se produce en el sistema cuando se encuentra en funcionamiento. La fuerza de rozamiento producida por la tensión de la cuerda se encuentra establecida entre valores de 8-12N aproximadamente.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Se ha de esclarecer que la tensión de la cuerda cambia a lo largo de las pruebas debido al nudo corredero realizado en la cuerda, necesario para poder anudar la cuerda mediante el gancho colocado en el extremo.

En definitiva, como se puede apreciar en la Figura 80 la fuerza de rozamiento aumenta conforme aumenta la velocidad de rotación, debiéndose esto a que con cada prueba la tensión de la cuerda va aumentando.

❖ *Fuerza de rozamiento a diferentes alturas*

En primer lugar, se establece que en el Anexo VII. Estudios anteriores fuerza de rozamiento bomba de mecate se encuentran los datos y gráficas relativas al estudio realizado en el proyecto "Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate", donde se llegó a la conclusión que la fuerza de rozamiento no variaba con la altura (todo el experimento y datos se encuentran en el anexo anteriormente mencionado).

Sin embargo en los experimentos realizados con la bomba de mecate motorizada se pudo apreciar como la fuerza de rozamiento si aumentaba con la altura:

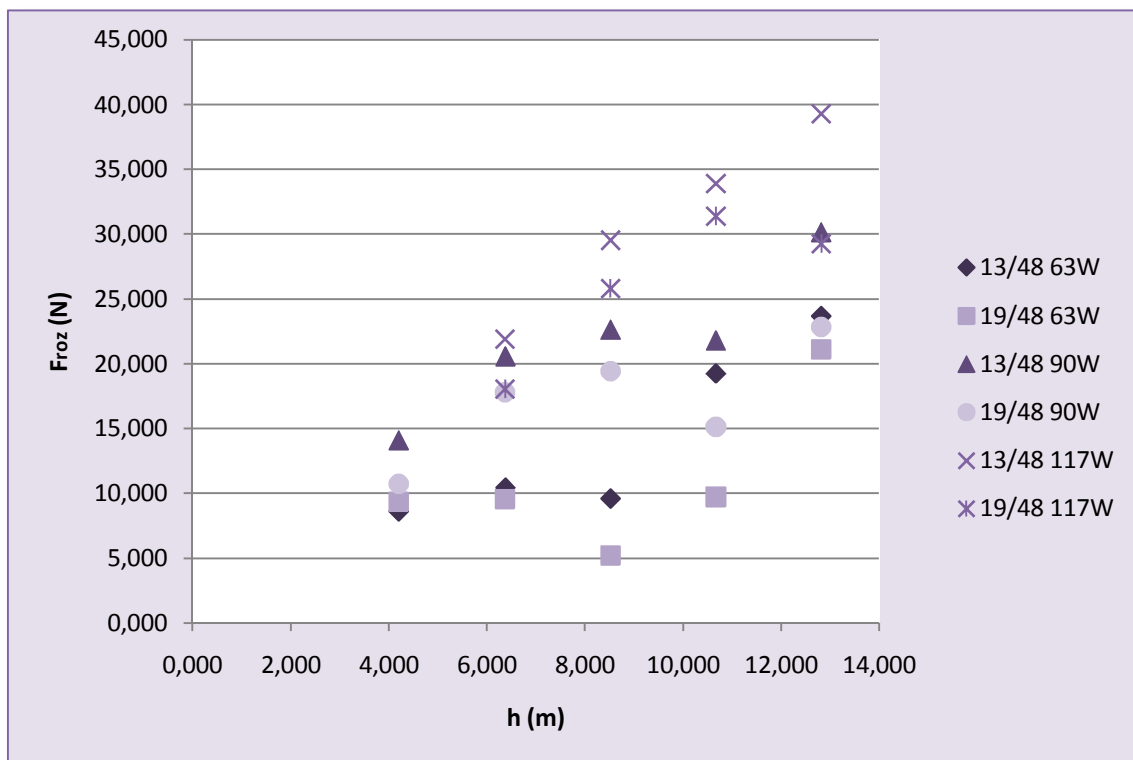


Figura 81. Fuerza de rozamiento frente a altura

En definitiva, con la siguiente gráfica se puede establecer que la fuerza de rozamiento entre el pistón y la tubería tendrá una gran relevancia, puesto que, la fuerza de rozamiento aumenta considerablemente.

Anteriormente la afirmación realizada no se puede considerar totalmente cierta, ya que, durante el experimento el sistema se encontraba en reposo, por lo que, en cierta manera lo que se halló fue la fuerza de arrastre para provocar el movimiento de la rueda motriz, pero no para extraer agua.



5. CONCLUSIONES

Una vez, definida toda la investigación realizada con una configuración de bomba de mecate motorizada, fue necesario realizar un análisis con las conclusiones que se han ido obteniendo, pudiendo continuar e incitar a nuevos estudios relacionados con las bombas de mecate.

En primer lugar, se ha conseguido adaptar un motor eléctrico cualquiera a la bomba de mecate, mediante un proceso sencillo y fiable, que se puede realizar en cualquier lugar, siempre que se acondicione un sistema para la carga de las baterías. Gracias a este tipo de soluciones se podrá trabajar en condiciones más difíciles durante la extracción de agua (mayores alturas), ya que se ha eliminado el factor de fuerza física y cansancio que se obtiene cuando el sistema es manual.

Los datos obtenidos muestran que la bomba de mecate motorizada es una solución aceptable para el abastecimiento de agua, ya que durante las pruebas se ha podido observar que el sistema es capaz de extraer un caudal mucho mayor obteniendo un flujo constante durante todo el tiempo que duraron los ensayos, a diferencia de la utilización de otros sistemas manuales como la bici-bomba o mediante manivela. Por lo que, la bomba motorizada es un sistema único, que permitirá suministrar una energía constante durante un período de tiempo indefinido, muy superior a lo conseguido con los otros sistemas.

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Al analizarse el caudal de pérdidas en función de la velocidad angular, se han obtenido unos resultados muy significativos. En primer lugar, para poder trabajar con una eficiencia máxima es necesario trabajar a altas velocidades, pudiendo desprejarse las pérdidas de agua, debiéndose encontrar la bomba de mecate preparada para trabajar a las mismas. Es por ello, que se considera fundamental que la instalación se prepare para poder trabajar a estas revoluciones en futuros proyectos. Varias formas de poder aumentar esto sería cambiar el caudalímetro debido a la estrechez del diámetro que presenta y a los errores de medida que comete a bajas frecuencias, aumentar el volumen del barreño acumulador o aumentar el diámetro de la tubería de descenso de agua. Si se realiza esta mejora se podrá trabajar a un rango superior de velocidad angular pudiendo alcanzar una configuración de rendimiento volumétrico máximo.

En este proyecto se ha podido establecer la fuerza de rozamiento que aparecía en la instalación durante el funcionamiento de la bomba de mecate, pudiendo concluir que el parámetro de tensión de la cuerda como la altura a la que se encuentra la instalación son dos parámetros que hay que tener en cuenta por igual en el valor de la fuerza de rozamiento, ya que ambos influyen en ella. En un futuro, sería bueno poder establecer el valor de tensión de la cuerda para cada altura y potencia suministrada al sistema, buscando una manera de autoenlazar la cuerda que impida el cambio de la tensión, es decir, impidiendo el movimiento de los nudos.

Por último, resaltar el gran rendimiento que presenta la bomba con la configuración motorizada, obteniéndose un punto óptimo de funcionamiento alrededor del 68,40% para frecuencias próximas a 1Hz. Disminuyendo el rendimiento según se va aumentando la profundidad del pozo.

A parte de todo lo dicho anteriormente también existen otros problemas que hay que mejorar en la bomba de mecate al igual que en la configuración motorizada.

Sería necesario para próximos proyectos modificar el sistema de frenado, sobre todo lo relacionado con el sistema de presión de tablas de madera y pastillas de freno de bicicleta. Debido a que este sistema aplica una presión extremadamente elevada durante algunas pruebas que provoca que las pastillas se muevan del sitio, no pudiendo continuar con las pruebas. Es por ello, que se puede mejorar el sistema aportando unos resultados más fidedignos simulando diferentes alturas.

También sería importante obtener algún valor no simulado de alturas, doblando la altura de la instalación, pudiendo transportar el sistema superior a la zona de techo de la nave, disponiendo de esta forma de una altura constante próxima a los 8 metros. De esta forma, se obtendrían datos reales que podrían ser comparables con los inscritos en este proyecto. Dentro de esta innovación, se podría mejorar la robustez de la estructura principal, para ser capaz de simular profundidades mayores.

Por último, otro punto de interés, si se procede a variar la altura o incluso la altura fija, es el análisis de las dimensiones y formas, por ejemplo de la tubería o pistones, buscando configuraciones donde se obtenga un rendimiento máximo.

NOMENCLATURA

M_{rueda} : Par que se ejerce en la rueda ($\text{N}\cdot\text{m}$)

M_{freno} : Par que se ejerce en el disco de freno ($\text{N}\cdot\text{m}$)

F_{rueda} : Fuerza que se ejerce en la rueda (N)

m_{din} : Masa del dinamómetro (kg)

R_r : Radio de la rueda (m)

$R_{\text{discofreno}}$: Radio del disco de freno (m)

P_{agua} : Peso del agua (kg)

P_{pistones} : Peso de los pistones (kg)

P_{cuerda} : Peso de la cuerda (kg)

$F_{\text{tubería-pistones}}$: Fuerza de rozamiento entre la tubería y los pistones (N)

$F_{\text{cojinetes-eje}}$: Fuerza de rozamiento entre los cojinetes y el eje (N)

$F_{\text{botella-cuerda}}$: Fuerza de rozamiento entre la botella y la cuerda (N)

$F_{\text{rozamiento}}$: Fuerza de rozamiento total (N)

$V_{\text{SubidaPistón}}$: Velocidad de ascenso de la cuerda y pistones por la tubería (m/s)

V_{agua} : Volumen de agua presente en la tubería (m^3)

V_{tub} : Volumen de la tubería (m^3)

V_{cuerda} : Volumen cuerda (m^3)

$V_{\text{pistón}}$: Volumen del pistón (m^3)

A_T : Área libre del interior de la tubería (m^2)

$A_{\text{TotalTubería}}$: Área interior de la tubería (m^2)

A_{cuerda} : Área de la cuerda autoenlazada (m^2)

d_{tub} : Diámetro de la tubería (m)

d_{cuer} : Diámetro cuerda (m)

N_p : Número de pistones (unidades)

$d_{\text{pist.cil}}$: Diámetro del pistón de la zona cilíndrica (m)

$h_{\text{pist.cil}}$: Altura del pistón de la zona cilíndrica (m)

$r_{\text{pist.con}}$: Radio del pistón de la zona cónica (m)

$h_{\text{pist.con}}$: Altura del pistón de la zona cónica (m)

Q_{ideal} : Caudal ideal (m^3/s)

$Q_{\text{teórico}}$: Caudal teórico (m^3/s)

$Q_{\text{pérdidas}}$: Caudal de pérdidas (m^3/s)

Q_{exp} : Caudal experimental (m^3/s)

ϕ : Factor de corrección del volumen de agua en la tubería

H_{FA} : Altura del frente de agua o columna de agua entre pistones (m)

H_p : Altura entre pistones (m)

h : Altura de la tubería (m)

ρ : Densidad del agua (kg/m^3)

g : Gravedad (m/s^2)

Z_{motor} : Número de dientes engranaje motor

$d_{\text{engranajemotor}}$: Diámetro del engranaje planetario del motor (m)

w_{motor} : Velocidad de giro del eje del motor (rad/s)

Z_{rueda} : Número de dientes engranaje rueda motriz

$d_{\text{engranajerueda}}$: Diámetro del engranaje planetario del eje de la rueda motriz (m)

w_{rueda} : Velocidad de giro de la polea motriz (rad/s)

$W_{\text{eléctrica}}$: Potencia eléctrica (W)

W_{motor} : Potencia de trabajo del motor (W)

$W_{\text{motor-ruedamotriz}}$: Potencia de trabajo de la rueda motriz (W)

$W_{\text{útil}}$: Potencia de trabajo para la extracción de agua (W)

V : Voltaje (V)

I : Intensidad o corriente consumida (A)

T : Par del motor ($\text{N}\cdot\text{m}$)

η_v : Rendimiento volumétrico

η_F : Rendimiento de fuerza

η_{bomba} : Rendimiento de fuerza



BIBLIOGRAFÍA

- (1) Alexis Randrianasolo y Karl Erpf "Madagascar Rope Pump Specification". SKAT-RWSN Publication. 2004.
- (2) Arjen van der Val, Henk Holstag y Jan de Jong "Rope Pump Manual". Fundación Práctica. 2006.
- (3) Alejandro Montecinos Larrosa "La bomba de sogá". Editorial Cubasolar.
- (4) Alejandro Montecinos Larrosa y Leopoldo Gallardo Quiñones "Tecnologías para el abasto de agua". Editorial Cubasolar.
- (5) Constructores de bombas de mecate BOMESA (Bombas de mecate, S.A.)
<http://www.ropepumps.org/>
- (6) Motores eléctricos bicicletas
<http://www.ciclotekstore.com>
<http://www.motorparabicicleta.com>
<http://ruedaselectricas.com>
- (7) Javier Tobella Arredondo "Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate". Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
- (8) Sergio Ruíz Martín "Instrumentación, adquisición de datos y ensayos de bici-bombas de mecate". Universidad Carlos III de Madrid. 2011.



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

(9) Javier Padrón González "Instrumentación, adquisición de datos para laboratorio multidisciplinar y motorización de bomba manual de mecate".

Universidad Carlos III de Madrid. 2012.

(10) Manuel Patrón Codesido "Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate". Universidad Carlos III de Madrid. 2012.



ANEXOS

Índice de anexos:

I. Parámetros representativos de la bomba de mecate.....	159
II. Hoja de características del motor eléctrico	162
III. Altura de la instalación	166
IV. Toma de datos bomba de mecate manual	168
A. Datos medición frecuencia no constante en bomba de mecate manual sin utilización del sistema de frenado.....	168
B. Datos medición frecuencia constante en bomba de mecate manual sin utilización del sistema de frenado	170
C. Datos medición frecuencia no constante en bomba de mecate manual utilizando sistema de frenado	171
V. Toma de datos de bici-bomba de mecate	173
A. Datos medición frecuencia no constante en bici-bomba de mecate utilizando sistema de frenado	173
VI. Toma de datos bomba de mecate motorizada.....	175
A. Datos medición bomba de mecate motorizada sin utilización del sistema de frenado.....	175
B. Datos medición bomba de mecate motorizada utilizando sistema de frenado	177
VII. Estudios anteriores fuerza de rozamiento bomba de mecate.....	179
A. Datos medición tensión cuerda-fuerza de rozamiento con 4 pistones en tubería	179
B. Datos medición tensión cuerda-fuerza de rozamiento con 8 pistones en tubería	180
C. Análisis de los datos	180
VIII. Tablas teóricas	183
A. Caudal extraído e ideal	183
B. Caudal teórico corregido teniendo en cuenta las pérdidas.....	186



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

1. Caudales sin tener en cuenta calibración del contador volumétrico	186
2. Caudales teniendo en cuenta calibración del contador volumétrico.....	189
C. Potencias de trabajo.....	192
D. Rendimientos	194
E. Fuerza de rozamiento.....	196
IX. Representaciones gráficas.....	198
A. Caudal experimental frente a frecuencia	198
B. Caudal experimental frente a altura	201
C. Comparación caudal teórico ideal frente a experimental	204
D. Caudal de pérdidas.....	207
E. Comparación caudal teórico y experimental.....	210
F. Desviación entre el caudal teórico y experimental corregido	213
G. Potencias de trabajo.....	218
H. Rendimiento.....	221
I. Fuerza de rozamiento.....	222
X. Comparación de las distintas configuraciones de la bomba de mecate	226

I. Parámetros representativos de la bomba de mecate

ELEMENTO	CONCEPTO	MAGNITUD	UNIDAD
ALTURA TUBERÍA			
	Altura de suelo tubería superior	4310	mm
	Longitud tubo de salida	4200	mm
DEPÓSITO			
	Altura	830	mm
	Diámetro	800	mm
	Capacidad	350	l
CAJA GUÍA			
Láminas de acero	Espesor láminas	15	mm
	Altura caja guía	200	mm
	Lado caja guía	220	mm
	Ancho caja guía	180	mm
	Diámetro agujero botella	80	mm
	Diámetro salida pistones	32	mm
	Diámetro entrada pistones	50	mm
CONDUCTO DE SUBIDA			
Tubería de PVC transparente	Longitud de tubería	2600	mm
	Diámetro exterior	32	mm
	Diámetro interior	27,2	mm
Ensanchamiento salida pistones	Longitud	500	mm
	Diámetro	50	mm
Ensanchamiento entrada pistones	Longitud	500	mm
	Diámetro	104	mm
SURTIDOR			
	Diámetro tubería de entrada pistones	32	mm
	Diámetro tubería de salida pistones	50	mm
	Diámetro de tubería de descarga	50	mm
BARREÑO ACUMULADOR			
	Diámetro	374	mm
	Altura	97	mm
	Capacidad	15	l
CONDUCTO DE BAJADA			



	Diámetro exterior	32	mm
	Diámetro interior	27,2	mm
	Longitud	2700	mm
ESTRUCTURA SUPERIOR			
Perfiles de barras	Número de barras	12	unidades
	Número de refuerzos	5	unidades
	Altura estructura	1010	mm
	Lado estructura	670	mm
	Ancho estructura	310	mm
	Ancho refuerzos	30	mm
COJINETES			
Madera de pino	Altura cojinete	90	mm
	Lado cojinete	120	mm
	Ancho cojinete	40	mm
	Diámetro menor	23	mm
	Diámetro mayor	25,4	mm
ABRAZADERAS			
	Diámetro	80	mm
	Ancho	20	mm
MANIVELA			
Tubo de cobre	Longitud eje	220	mm
	Longitud brazo	270	mm
	Longitud empuñadura	400	mm
	Diámetro	22	mm
RUEDA			
Rueda de ciclomotor "vespino"	Radio rueda	194,5	mm
Recubrimiento de goma	Espesor goma	1,5	mm
Cuerda	Radio cuerda	2	mm
$R_{TOTALrueda} = R_{rueda} + e_{goma} + R_{cuerda}$	Radio total rueda	198	mm
CUERDA			
Poliamida	Diámetro cuerda	4	mm
	Longitud cuerda	10000	mm
PISTONES			
Cilindro	Altura cilindro	5	mm
	Diámetro cilindro	26,5	mm
Cono	Altura cono	6,5	mm



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

	Diámetro cono máximo	26,5	mm
	Ángulo cono	30	º
	Diámetro interior	4	mm
CAUDALÍMETRO			
	Diámetro	25,4	mm
DISCO DE FRENO			
	Espesor disco de freno	5	mm
	Radio disco de freno	60	mm

Tabla 19. Dimensionado de los elementos que conforman bomba de mecate

II. Hoja de características del motor eléctrico

Motor con control de velocidad/par/posición integrado. Alimentación de 36 VDC (Voltaje Corriente Directa plana sin cambios ni huecos) y 2 sentidos de giro, encoder incremental integrado.

W_e (W)	W_m (W)	η
51,012	22,966	0,450
62,388	34,903	0,559
76,212	48,433	0,636
92,232	62,761	0,680
110,844	80,716	0,728
131,832	99,602	0,756
154,800	121,244	0,783

Tabla 20. Hoja de características del motor eléctrico

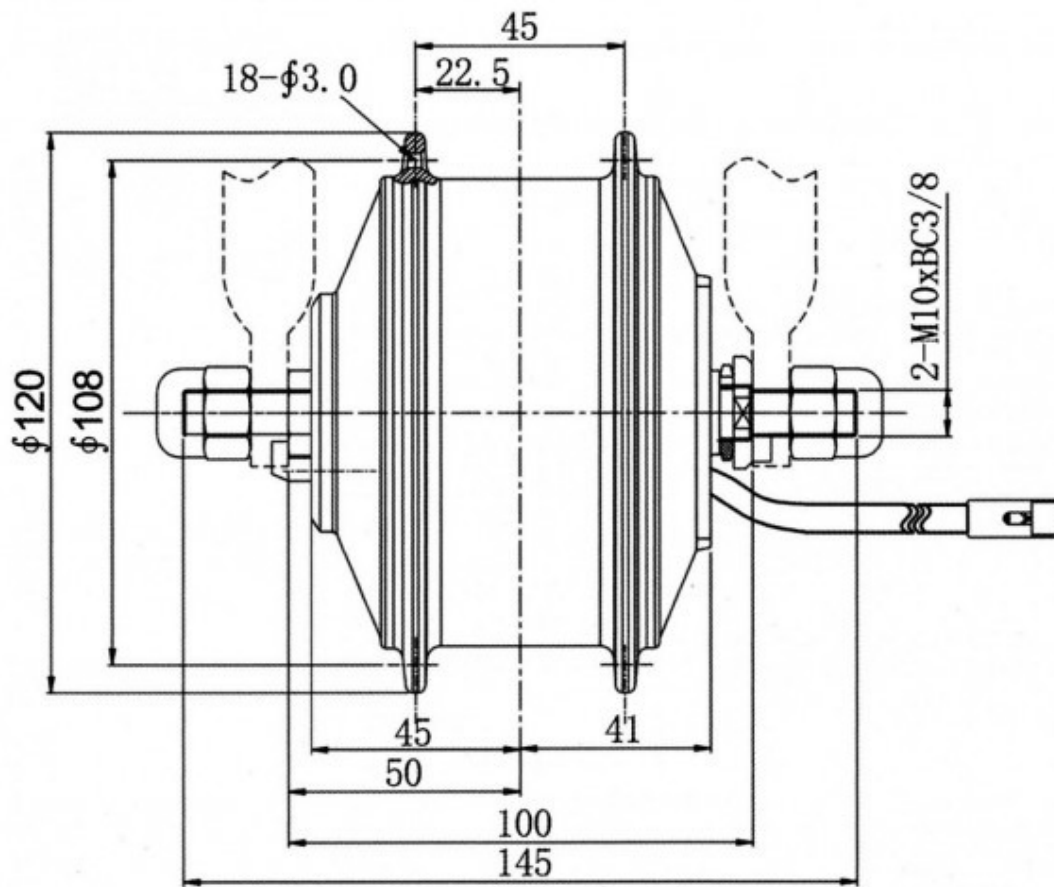


Figura 82. Plano del motor eléctrico

El controlador del motor fue pequeño y ligero, con unas dimensiones de 30x53x97 mm, el cual poseía las siguientes características:

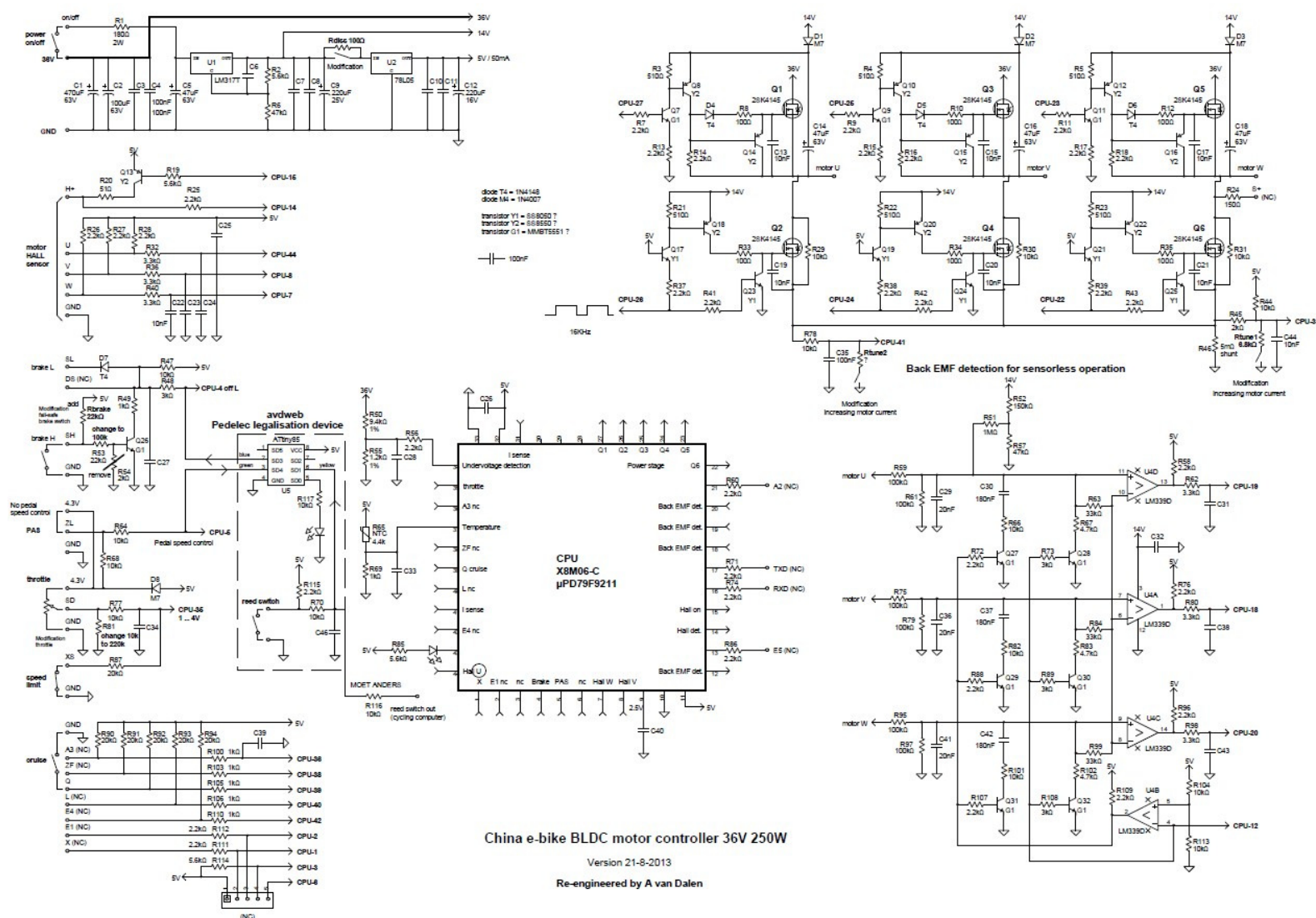
- ✓ Brushless DC (BLDC) motor 36V 250W
- ✓ Sobrecorriente 12A
- ✓ Sensor Hall o funcionamiento sin sensor
- ✓ Detección de baja tensión de batería (27,7 V)
- ✓ Protección contra sobrettemperatura
- ✓ Frenos de alto nivel de tensión y entrada de nivel de baja tensión

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

- ✓ Control LED de interior
- ✓ Peso 200 g
- ✓ X8M06-C Controlador IC, TQFP44
- ✓ 6 de potencia MOSFET 2SK4145, $R_{DS(on)}$ 10 m Ω , $VD_{SS_{max}}$ 60V, ID_{max} 84A
- ✓ Corriente de reposo off-state <30uA
- ✓ Consumo de corriente con motor a plena velocidad de 60mA
- ✓ Frecuencia de conmutación 16kHz
- ✓ Acelerador de tensión 1...4V

A continuación, se muestra un esquema del controlador:

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate



III. Altura de la instalación

Sustituyendo los diferentes valores de la ecuación teórica en la que se relaciona el par de frenado con el par que se obtiene de la extracción de agua, se obtiene una ecuación en la que la altura varía con la masa del dinamómetro, configurado para medir linealmente la fuerza de frenado:

$$\left[(5,810710^{-4}h - N_p 3,952710^{-6} - 1,256610^{-5}h) 9792,062 \right] 0,198 = m_{din} \cdot 9,80,06 \quad (8)$$

Si a la ecuación anterior (8), se le aporta valores a la masa acotados entre 0 a 20 kg, se obtiene la tabla que se muestra a continuación, donde se observa la altura simulada para cada valor de masa del dinamómetro:

Masa dinamómetro (kg)	Altura (m)	Altura real (m)
0	4,2000	4,2000
1	0,5613	4,7613
2	1,1017	5,3017
3	1,6352	5,8352
4	2,1756	6,3756
5	2,7090	6,9090
6	3,2495	7,4495
7	3,7829	7,9829
8	4,3233	8,5233
9	4,8638	9,0638
10	5,3972	9,5972
11	5,9376	10,1376
12	6,4711	10,6711
13	7,0115	11,2115
14	7,5450	11,7450
15	8,0854	12,2854
16	8,6189	12,8189
17	9,1593	13,3593
18	9,6927	13,8927
19	10,2332	14,4332
20	10,7666	14,9666

Tabla 21. Relación teórica entre fuerza dinamómetro-altura

IV. Toma de datos bomba de mecate manual

La toma de datos durante la configuración manual fue realizada por dos usuarios, diferenciándose en el proyecto como Usuario A y B.

A. Datos medición frecuencia no constante en bomba de mecate manual sin utilización del sistema de frenado

Los datos que aparecen a continuación fueron tomados para observar como variaba la frecuencia cuando el agua era extraída por seres humanos utilizando la manivela. Ya que en estos casos, intervenía el factor del cansancio cuando se utilizaba la bomba de mecate, impidiendo que el número de repeticiones de giro de la rueda motriz fuera constante en el tiempo. La toma de datos fue realizada a la misma altura pero cuando se utilizaba el freno el cansancio era más evidente.

Es por esta razón, por la que, los datos en configuración manual no son comparables con los obtenidos con configuración motorizada de la bomba de mecate.

	n (rev)						
Usuario	1 min	2 min	3 min	4 min	V_o (m ³)	V_f (m ³)	V_{total} (m ³)
Usuario A	54	103	140	176	24,12	24,24	0,12
Usuario A	60	113	165	212	24,55	24,69	0,14
Usuario B	58	112	155	194	24,24	24,42	0,18
Usuario B	51	100	146	190	24,69	24,82	0,13

Tabla 22. Toma de datos a frecuencia no constante en bomba de mecate manual

En la Figura 83 se observa claramente como está no suele ser constante, siendo descendiente para cada minuto que tiene lugar:

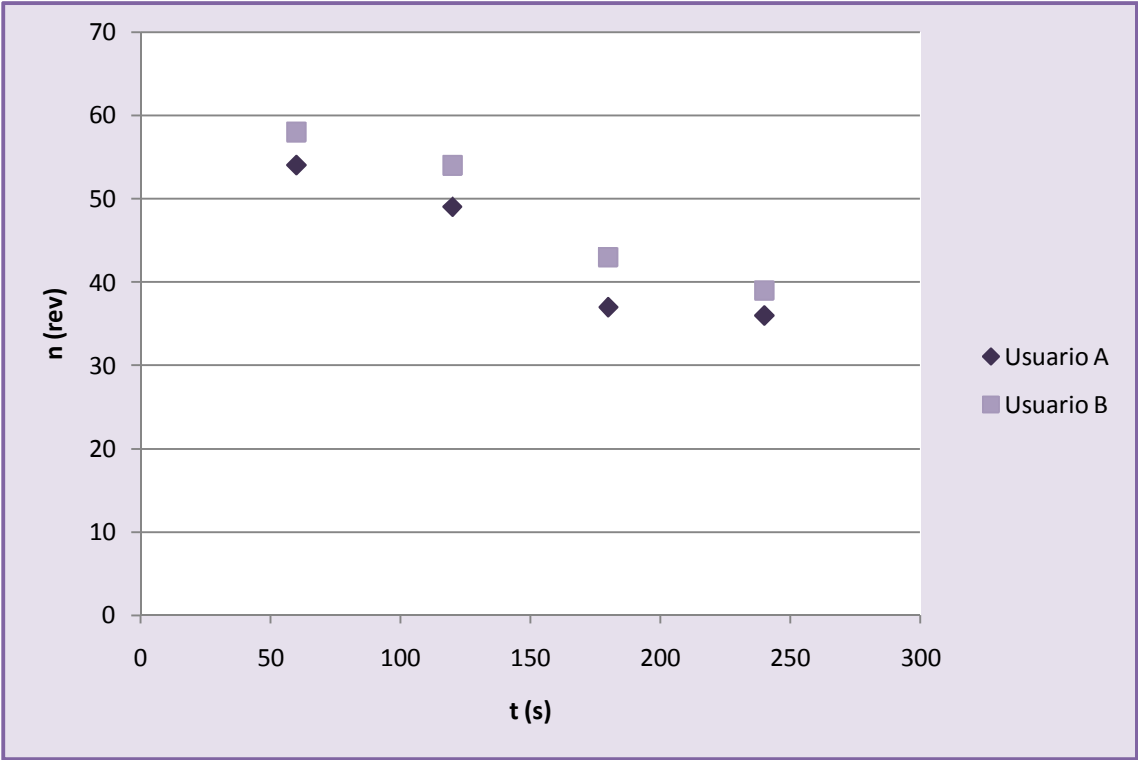


Figura 83. Frecuencia de giro frente al tiempo bomba de mecate manual

B. Datos medición frecuencia constante en bomba de mecate manual sin utilización del sistema de frenado

En este apartado se tomaron las medidas sin utilizar el freno y a frecuencia constante, mediante la ayuda de un metrónomo, debido a este motivo el rango de frecuencias fue limitado puesto que, se trabajó en rangos alcanzables fácilmente por el ser humano.

Usuario	h (m)	n (r.p.m.)	T (s)	V _o (m ³)	V _i (m ³)	V _{total} (m ³)
Usuario A	4,2	22	240	33,042	33,069	0,027
Usuario A	4,2	28	240	31,955	31,989	0,034
Usuario A	4,2	30	240	32,966	33,001	0,035
Usuario A	4,2	32	240	33,001	33,041	0,04
Usuario A	4,2	34	240	32,023	32,068	0,045
Usuario A	4,2	40	240	31,814	31,883	0,069
Usuario A	4,2	46	240	32,114	32,217	0,103
Usuario A	4,2	52	240	32,321	32,452	0,131
Usuario A	4,2	58	240	32,738	32,894	0,156
Usuario B	4,2	28	240	31,989	32,023	0,034
Usuario B	4,2	34	240	32,068	32,114	0,046
Usuario B	4,2	40	240	31,883	31,955	0,072
Usuario B	4,2	46	240	32,217	32,321	0,104
Usuario B	4,2	52	240	32,452	32,582	0,13
Usuario B	4,2	58	240	32,582	32,738	0,156

Tabla 23. Toma de datos a frecuencia constante en bomba de mecate manual

C. Datos medición frecuencia no constante en bomba de mecate manual utilizando sistema de frenado

En este apartado se tomaron las medidas simulando diferentes alturas con el freno, por lo que, fue muy difícil mantener la frecuencia constante.

Usuario	m (kg)	h (m)	n (rev)	T (s)	V _o (m ³)	V _f (m ³)	V _{total} (m ³)
Usuario A	0	4,200	210	240	26,101	26,246	0,145
Usuario A	3	5,810	192	240	26,843	26,97	0,127
Usuario A	4	6,347	188	240	27,104	27,226	0,122
Usuario A	6	7,420	178	240	27,365	27,472	0,107
Usuario A	7	7,957	174	240	27,567	27,67	0,103
Usuario A	11	10,103	170	240	26,5	26,598	0,098
Usuario A	16	12,786	130	240	26,318	26,372	0,054
Usuario B	0	4,200	206	240	26,97	27,104	0,134
Usuario B	2	5,273	200	240	25,969	26,101	0,132
Usuario B	3	5,810	190	240	26,615	26,741	0,126
Usuario B	4	6,347	190	240	27,245	27,365	0,12
Usuario B	8	8,493	172	240	27,67	27,771	0,101
Usuario B	12	10,640	170	240	27,472	27,567	0,095
Usuario B	15	12,250	142	240	26,246	26,318	0,072

Tabla 24. Toma de datos a frecuencia no constante con sistema de frenado en bomba de mecate manual

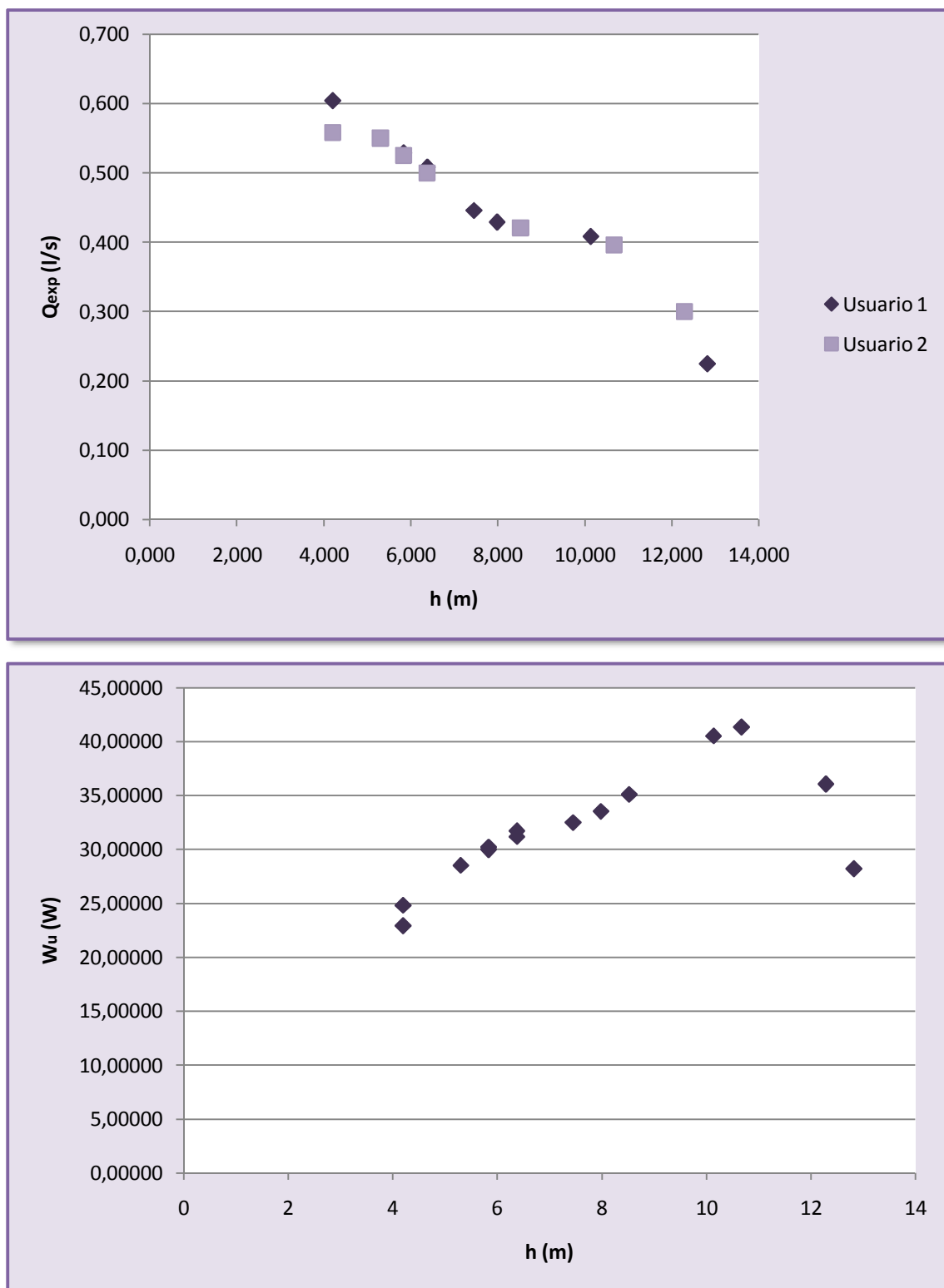


Figura 84. Caudal (imagen superior) y trabajo útil (imagen inferior) frente a altura en bomba de mecate manual

V. Toma de datos de bici-bomba de mecate

En este apartado se reflejarán los datos obtenidos por Manuel Patrón en el proyecto “Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate”, utilizando la bicicleta como medio para extraer agua a través de la bomba de mecate. Puesto que, a lo largo del proyecto se realizan comparaciones sobre los diferentes modelos de caracterización de la bomba de mecate.

A. Datos medición frecuencia no constante en bici-bomba de mecate utilizando sistema de frenado

Usuario	m (kg)	h (m)	n (rev)	T (s)	V _{total} (m ³)
Usuario A	0	4,20	286	240	0,185
Usuario A	2	5,27	257	240	0,176
Usuario A	3	5,80	256	240	0,170
Usuario A	4	6,33	246	240	0,165
Usuario A	7	7,93	225	240	0,146
Usuario A	8	8,47	216	240	0,135
Usuario A	9	9,00	210	240	0,132
Usuario A	11	10,07	210	240	0,125
Usuario A	14	11,67	198	240	0,115
Usuario A	17	13,27	178	241	0,097
Usuario A	18	13,80	179	240	0,095
Usuario B	0	4,20	275	240	0,180
Usuario B	3	5,80	260	240	0,173
Usuario B	4	6,33	250	240	0,162
Usuario B	7	7,93	230	240	0,147
Usuario B	9	9,00	215	240	0,128
Usuario B	11	10,07	200	240	0,116
Usuario B	14	11,67	195	240	0,110
Usuario B	17	13,27	185	240	0,103
Usuario B	18	13,80	185	240	0,096

Tabla 25. Toma de datos a frecuencia no constante con sistema de frenado en bici-bomba

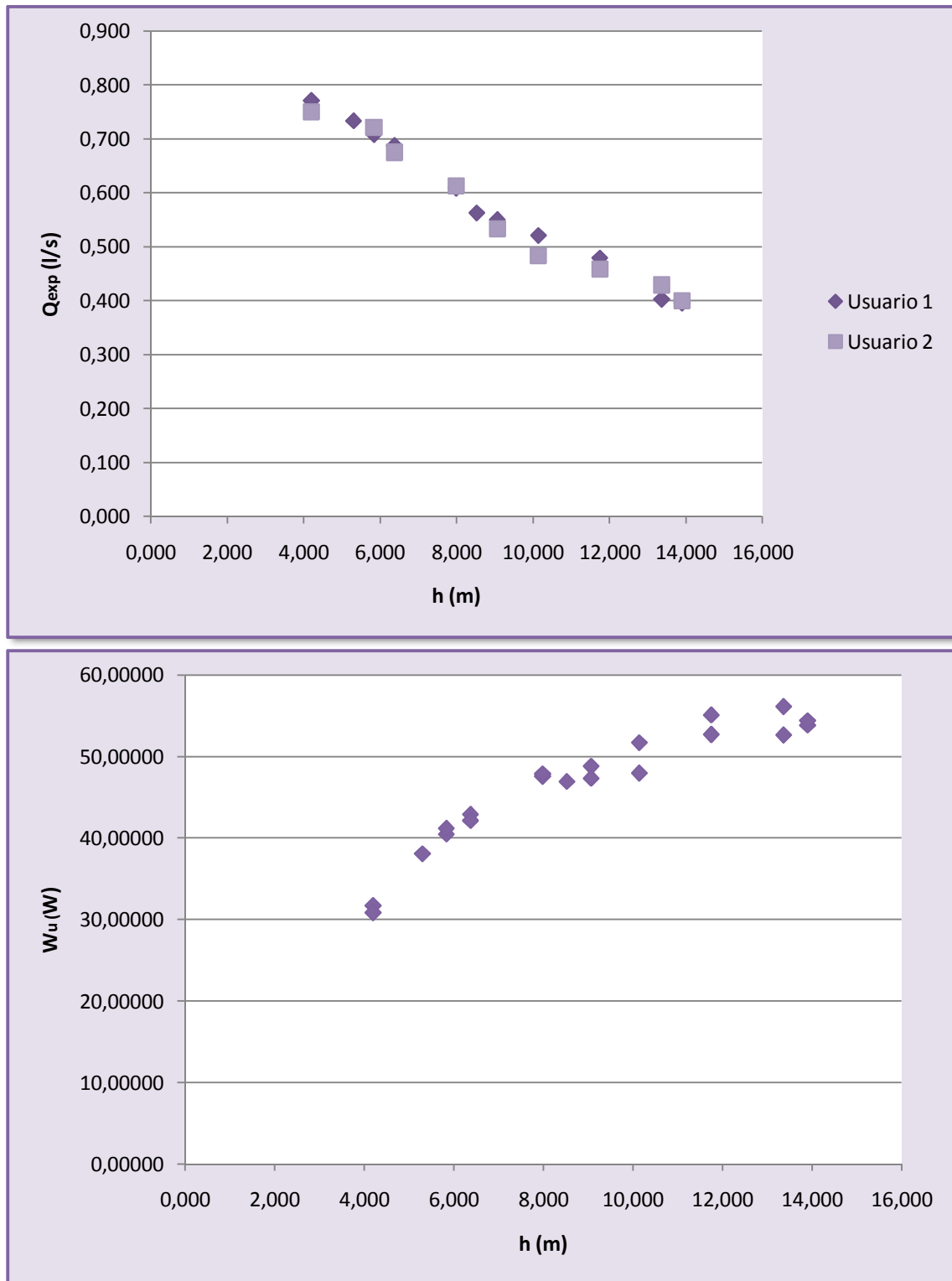


Figura 85. Caudal (imagen superior) y trabajo útil (imagen inferior) frente a altura en bici-bomba

VI. Toma de datos bomba de mecate motorizada

A. Datos medición bomba de mecate motorizada sin utilización del sistema de frenado

Las medidas con código A se realizaron con una relación de transmisión de 13/48 y las medidas con código B se realizaron con una relación de transmisión de 19/48.

Código	W_e (W)	n (rev)	T (s)	V_o (m ³)	V_f (m ³)	V_{total} (m ³)
A1	31,50	82	220	33,386	33,407	0,021
A2	36,00	137	231	35,057	35,104	0,047
A3	43,20	153	232	35,417	35,493	0,076
A4	54,00	165	240	36,489	36,582	0,093
A5	59,40	195	240	36,591	36,708	0,117
A6	61,20	204	240	35,992	36,12	0,128
A7	63,00	214	241	39,268	39,408	0,140
A8	72,00	262	240	34,097	34,274	0,177
A9	75,60	281	240	33,895	34,088	0,193
A10	82,80	302	240	36,120	36,332	0,212
A11	90,00	314	240	39,427	39,647	0,220

Tabla 26. Toma de datos con relación de transmisión 48/13 en bomba de mecate motorizada

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Código	I (A)	n (rev)	T (s)	V _o (m ³)	V _f (m ³)	V _{total} (m ³)
B1	27,00	99	223	34,533	34,561	0,028
B2	34,20	135	231	34,869	34,913	0,044
B3	39,60	161	233	34,561	34,65	0,089
B4	54,00	172	240	38,871	38,972	0,101
B5	63,00	209	240	36,712	36,844	0,132
B6	68,40	250	241	36,845	37,016	0,171
B7	79,20	286	240	37,016	37,213	0,197
B8	90,00	345	241	40,28	40,523	0,243

Tabla 27. Toma de datos con relación de transmisión 48/19 en bomba de mecate motorizada

B. Datos medición bomba de mecate motorizada utilizando sistema de frenado

Las medidas con el código A tiene una relación de transmisión de 13/48 y las del código B de 19/48. Cada número representa diferentes potencias eléctricas suministradas al motor: 1 es igual a 63 W, 2 es igual a 90 W y 3 es igual a 117 W. Mientras que la letra minúscula representa diferentes alturas. Siendo todas estas medidas las que permitieron caracterizar el sistema de forma óptima.

Código	W_e (W)	m (kg)	n (rev)	T (s)	V_o (m ³)	V_f (m ³)	V_{total} (m ³)
A1a	63	0	214	241	39,268	39,408	0,140
A1b	63	4	149	232	39,182	39,253	0,071
A1c	63	8	120	240	36,384	36,422	0,038
A1d	63	12	87	240	37,288	37,313	0,025
A1e	63	16	72	240	36,437	36,456	0,019
A2a	90	0	314	240	39,427	39,647	0,220
A2b	90	4	210	241	39,651	39,789	0,138
A2c	90	8	168	240	35,694	35,780	0,086
A2d	90	12	145	246	40,039	40,099	0,060
A2e	90	16	116	243	37,360	37,398	0,038
A3a	117	0	----	-----	-----	-----	-----
A3b	117	4	291	241	39,826	40,03	0,204
A3c	117	8	217	242	35,495	35,629	0,134
A3d	117	12	179	243	37,398	37,495	0,097
A3e	117	16	151	245	38,479	38,554	0,075

Tabla 28. Toma de datos con relación de transmisión 48/13 y sistema de frenado en bomba de mecate motorizada

Código	W_e (W)	m (kg)	n (rev)	T (s)	V_o (m ³)	V_f (m ³)	V_{total} (m ³)
B1a	63	0	209	240	36,712	36,844	0,132
B1b	63	4	152	240	37,859	37,934	0,075
B1c	63	8	130	240	40,206	40,251	0,045
B1d	63	12	99	240	36,457	36,489	0,032
B1e	63	16	74	240	37,318	37,34	0,022
B2a	90	0	345	241	38,628	38,871	0,243
B2b	90	4	221	242	38,051	38,200	0,149
B2c	90	8	176	240	37,502	37,603	0,101
B2d	90	12	158	240	38,200	38,268	0,068
B2e	90	16	125	242	35,652	35,694	0,042
B3a	117	0	----	-----	-----	-----	-----
B3b	117	4	312	241	38,258	38,485	0,217
B3c	117	8	228	240	37,634	37,789	0,155
B3d	117	12	184	241	40,099	40,206	0,107
B3e	117	16	166	240	35,901	35,983	0,082

Tabla 29. Toma de datos con relación de transmisión 48/19 y sistema de frenado en bomba de mecate motorizada

VII. Estudios anteriores fuerza de rozamiento bomba de mecate

La siguiente toma de datos fue realizada por Manuel Patrón en el proyecto “Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate”. Donde se pretende dar a comprender y modelar la fuerza de rozamiento de la que depende la bomba de mecate.

A. Datos medición tensión cuerda-fuerza de rozamiento con 4 pistones en tubería

Tensión cuerda (N)	Fuerza rozamiento (N)
32,765	14,028
29,822	13,244
26,487	7,946
20,601	7,554
14,617	6,573
13,734	3,237

Tabla 30. Toma de datos fuerza de rozamiento tubería-pistón utilizando 4 pistones

B. Datos medición tensión cuerda-fuerza de rozamiento con 8 pistones en tubería

Tensión cuerda (N)	Fuerza rozamiento (N)
33,32	15,68
31,07	13,33
29,40	11,27
27,93	11,27
27,244	8,134
24,500	9,604
22,050	7,938
21,266	8,134
18,620	8,134
15,680	6,958

Tabla 31. Toma de datos fuerza de rozamiento tubería-pistón utilizando 8 pistones

C. Análisis de los datos

La tensión de la cuerda influye en el valor tanto del rozamiento del eje con los cojinetes como en el rozamiento de la cuerda con la botella. Para cuantificar la relación que existe entre la tensión de la cuerda y el par de rozamiento se realiza un experimento que consta de los siguientes pasos:

1. Se instala un dinamómetro electrónico en la cuerda, sabiendo de esta forma la tensión a la que se encuentra la cuerda.
2. Posteriormente se coloca la manivela en posición horizontal, una vez situada en esta posición se engancha una báscula digital donde se cuelga un cubo.
3. Posteriormente se añade agua de forma progresiva al cubo, parando este proceso cuando el peso del agua sea suficiente para mover el sistema.

4. Finalmente, se repite este proceso cambiando la tensión de la cuerda.

La gráfica en la que se compararon los valores que se establecieron con cuatro pistones y con ocho fue la siguiente:

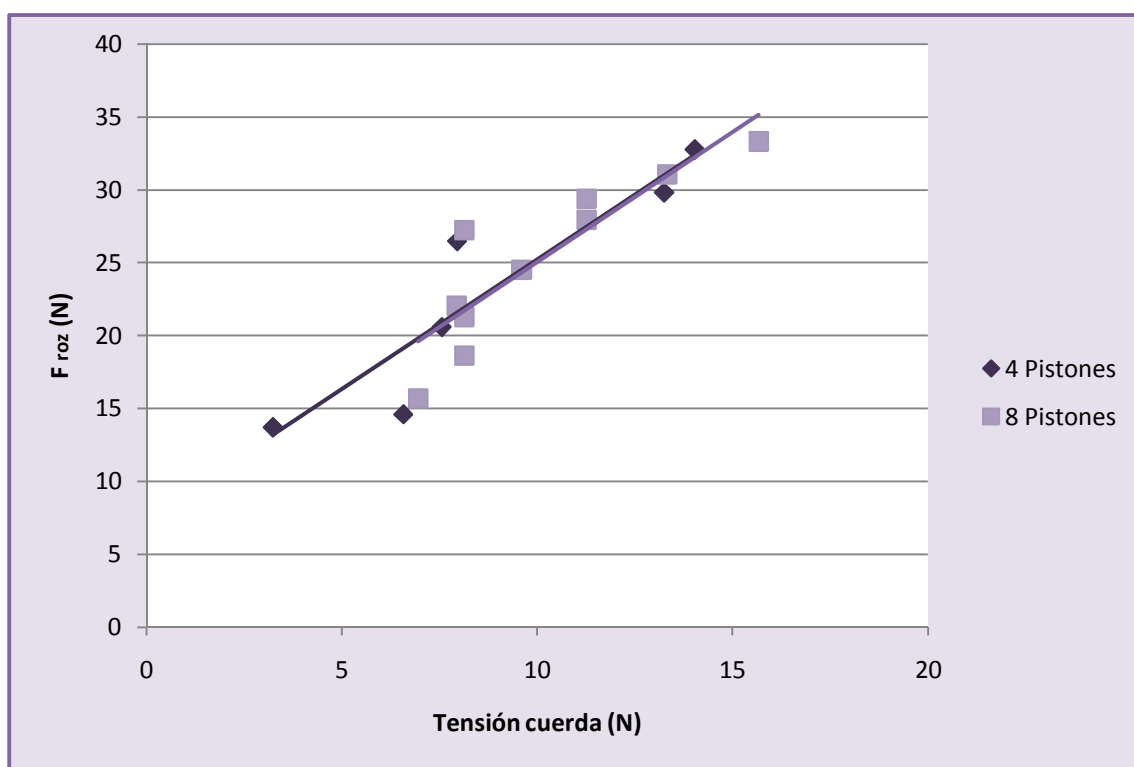


Figura 86. Fuerza de rozamiento frente a tensión de las cuerdas para distinto número de pistones

En la Figura 86 se observa que la influencia del número de pistones en el par de rozamiento es prácticamente despreciable, esta afirmación conduce a las siguientes conclusiones:

- La fuerza de rozamiento depende fundamentalmente de la tensión de la cuerda.
- El número de pistones no influye de forma determinante en el valor del par de rozamiento.



Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

- Las fuerzas de rozamiento se producen fundamentalmente en el eje superior y en la zona de la botella, siendo despreciable el rozamiento de los pistones en la tubería.

VIII. Tablas teóricas

A. Caudal extraído e ideal

En las siguientes tablas se representó el caudal experimental hallado durante las pruebas, el caudal experimental corregido con la recta de calibración establecida para el elemento de medida volumétrico (el cual afectaba a bajas frecuencias) y el caudal ideal o teórico cuando las pérdidas de agua en la instalación se consideraban despreciables, todos los datos anteriores dependieron de una velocidad ascendente del pistón o de una frecuencia constante.

Usuario	f (Hz)	Q_{exp} (l/s)	Q_{exp} corrección (l/s)	Q_{ideal} (l/s)
Usuario A	0,37	0,1125	0,0710	0,2575
Usuario A	0,47	0,1417	0,1159	0,3278
Usuario A	0,50	0,1458	0,1253	0,3512
Usuario A	0,53	0,1667	0,1514	0,3746
Usuario A	0,57	0,1875	0,1775	0,3980
Usuario A	0,67	0,2875	0,2875	0,4682
Usuario A	0,77	0,4292	0,4292	0,5385
Usuario A	0,87	0,5458	0,5458	0,6087
Usuario A	0,97	0,6500	0,6500	0,6789
Usuario B	0,47	0,1417	0,1159	0,3278
Usuario B	0,57	0,1917	0,1817	0,3980
Usuario B	0,67	0,3000	0,3000	0,44682
Usuario B	0,77	0,4333	0,4333	0,5385
Usuario B	0,87	0,5417	0,5417	0,6087
Usuario B	0,97	0,6500	0,6500	0,6789

Tabla 32. Caudal teórico sin tener en cuenta las pérdidas (caudal ideal) en bomba de mecate manual

Código	f (Hz)	Q_{exp} (l/s)	Q_{exp} corrección (l/s)	Q_{ideal} (l/s)
A1	0,34	0,0955	0,0500	0,2400
A2	0,57	0,2035	0,1941	0,4009
A3	0,64	0,3276	0,3276	0,4477
A4	0,69	0,3875	0,3875	0,4829
A5	0,81	0,4875	0,4875	0,5707
A6	0,85	0,5333	0,5333	0,5970
A7	0,89	0,5809	0,5809	0,6263
A8	1,09	0,7375	0,7375	0,7667
A9	1,17	0,8042	0,8042	0,8223
A10	1,26	0,8833	0,8833	0,8838
A11	1,31	0,9167	0,9167	0,9189
B1	0,41	0,1256	0,0913	0,2897
B2	0,56	0,1905	0,1798	0,3951
B3	0,67	0,3820	0,3820	0,4712
B4	0,72	0,4208	0,4208	0,5033
B5	0,87	0,5500	0,5500	0,6116
B6	1,04	0,7095	0,7095	0,7316
B7	1,19	0,8208	0,8208	0,8370
B8	1,44	1,0083	1,0083	1,0096

Tabla 33. Caudal teórico sin tener en cuenta las pérdidas (caudal ideal) en bomba de mecate motorizada

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

Código	h (m)	f (Hz)	Q _{exp} (l/s)	Q _{exp} corrección (l/s)	Q _{ideal} (l/s)
A1a	4,200	0,89	0,5809	0,5809	0,6263
A1b	6,376	0,62	0,3060	0,3060	0,4360
A1c	8,523	0,50	0,1583	0,1378	0,3512
A1d	10,671	0,36	0,1042	0,0620	0,2546
A1e	12,819	0,30	0,0792	0,0271	0,2107
A2a	4,200	1,31	0,9167	0,9167	0,9189
A2b	6,376	0,88	0,5726	0,5726	0,6145
A2c	8,523	0,70	0,3583	0,3583	0,4916
A2d	10,671	0,60	0,2439	0,2439	0,4243
A2e	12,819	0,48	0,1564	0,1332	0,3395
A3b	6,376	1,21	0,8465	0,8465	0,8516
A3c	8,523	0,90	0,5537	0,5537	0,6350
A3d	10,671	0,75	0,3992	0,3992	0,5238
A3e	12,819	0,63	0,3061	0,3061	0,4419
B1a	4,200	0,87	0,5500	0,5500	0,6116
B1b	6,376	0,63	0,3125	0,3125	0,4448
B1c	8,523	0,54	0,1875	0,1736	0,3804
B1d	10,671	0,41	0,1333	0,0990	0,2897
B1e	12,819	0,31	0,0917	0,0409	0,2166
B2a	4,200	1,44	1,0083	1,0083	1,0096
B2b	6,376	0,92	0,6157	0,6157	0,6467
B2c	8,523	0,73	0,4208	0,4208	0,5150
B2d	10,671	0,66	0,2833	0,2833	0,4624
B2e	12,819	0,52	0,1736	0,1563	0,3658
B3b	6,376	1,30	0,9004	0,9004	0,9130
B3c	8,523	0,95	0,6458	0,6458	0,6672
B3d	10,671	0,77	0,4440	0,4440	0,5385
B3e	12,819	0,69	0,3417	0,3417	0,4858

Tabla 34. Caudal teórico sin tener en cuenta las pérdidas (bomba de mecate ideal) con sistema de frenado en bomba de mecate motorizada

B. Caudal teórico corregido teniendo en cuenta las pérdidas

1. Caudales sin tener en cuenta calibración del contador volumétrico

Código	f (Hz)	Q_{exp} (l/s)	Q_{ideal} (l/s)	$Q_{pérdidas}$ (l/s)	$Q_{teórico}$ (l/s)
Usuario A	0,37	0,1125	0,2575	0,1487	0,1088
Usuario A	0,47	0,1417	0,3278	0,1795	0,1482
Usuario A	0,50	0,1458	0,3512	0,1898	0,1614
Usuario A	0,53	0,1667	0,3746	0,2001	0,1745
Usuario A	0,57	0,1875	0,3980	0,1741	0,2239
Usuario A	0,67	0,2875	0,4682	0,1352	0,3331
Usuario A	0,77	0,4292	0,5385	0,0962	0,4423
Usuario A	0,87	0,5458	0,6087	0,0572	0,5514
Usuario A	0,97	0,6500	0,6789	0,0183	0,6606
Usuario B	0,47	0,1417	0,3278	0,1795	0,1482
Usuario B	0,57	0,1917	0,3980	0,1741	0,2239
Usuario B	0,67	0,3000	0,4682	0,1352	0,3331
Usuario B	0,77	0,4333	0,5385	0,0962	0,4423
Usuario B	0,87	0,5417	0,6087	0,0572	0,5514
Usuario B	0,97	0,6500	0,6789	0,0183	0,6606

Tabla 35. Corrección del caudal teórico en bomba de mecate manual

Código	f (Hz)	Q_{exp} (l/s)	Q_{ideal} (l/s)	$Q_{pérdidas}$ (l/s)	$Q_{teórico}$ (l/s)
A1	0,34	0,0955	0,2400	0,1410	0,0989
A2	0,57	0,2035	0,4009	0,1725	0,2284
A3	0,64	0,3276	0,4477	0,1465	0,3012
A4	0,69	0,3875	0,4829	0,1271	0,3558
A5	0,81	0,4875	0,5707	0,0784	0,4923
A6	0,85	0,5333	0,5970	0,0637	0,5332
A7	0,89	0,5809	0,6263	0,0475	0,5787
A8	1,09	0,7375	0,7667	0,0000	0,7667
A9	1,17	0,8042	0,8223	0,0000	0,8223
A10	1,26	0,8833	0,8838	0,0000	0,8838
A11	1,31	0,9167	0,9189	0,0000	0,9189
B1	0,41	0,1256	0,2897	0,1629	0,1269
B2	0,56	0,1905	0,3951	0,1758	0,2193
B3	0,67	0,3820	0,4712	0,1335	0,3376
B4	0,72	0,4208	0,5033	0,1157	0,3877
B5	0,87	0,5500	0,6116	0,0556	0,5560
B6	1,04	0,7095	0,7316	0,0000	0,7316
B7	1,19	0,8208	0,8370	0,0000	0,8370
B8	1,44	1,0083	1,0096	0,0000	1,0096

Tabla 36. Corrección del caudal teórico en bomba de mecate motorizada

Código	h (m)	f (Hz)	Q_{exp} (l/s)	Q_{ideal} (l/s)	$Q_{pérdidas}$ (l/s)	$Q_{teórico}$ (l/s)
A1a	4,200	0,89	0,5809	0,6263	0,0475	0,5787
A1b	6,376	0,62	0,3060	0,4360	0,1530	0,2830
A1c	8,523	0,50	0,1583	0,3512	0,1898	0,1614
A1d	10,671	0,36	0,1042	0,2546	0,1475	0,1071
A1e	12,819	0,30	0,0792	0,2107	0,1282	0,0825
A2a	4,200	1,31	0,9167	0,9189	0,0000	0,9189
A2b	6,376	0,88	0,5726	0,6145	0,0540	0,5605
A2c	8,523	0,70	0,3583	0,4916	0,1222	0,3695
A2d	10,671	0,60	0,2439	0,4243	0,1595	0,2648
A2e	12,819	0,48	0,1564	0,3395	0,1847	0,1548
A3b	6,376	1,21	0,8465	0,8516	0,0000	0,8516
A3c	8,523	0,90	0,5537	0,6350	0,0426	0,5924
A3d	10,671	0,75	0,3992	0,5238	0,1043	0,4195
A3e	12,819	0,63	0,3061	0,4419	0,1498	0,2921
B1a	4,200	0,87	0,5500	0,6116	0,0556	0,5560
B1b	6,376	0,63	0,3125	0,4448	0,1482	0,2967
B1c	8,523	0,54	0,1875	0,3804	0,1839	0,1966
B1d	10,671	0,41	0,1333	0,2897	0,1629	0,1269
B1e	12,819	0,31	0,0917	0,2166	0,1308	0,0858
B2a	4,200	1,44	1,0083	1,0096	0,0000	1,0096
B2b	6,376	0,92	0,6157	0,6467	0,0361	0,6106
B2c	8,523	0,73	0,4208	0,5150	0,1092	0,4059
B2d	10,671	0,66	0,2833	0,4624	0,1384	0,3240
B2e	12,819	0,52	0,1736	0,3658	0,1920	0,1738
B3b	6,376	1,30	0,9004	0,9130	0,0000	0,9130
B3c	8,523	0,95	0,6458	0,6672	0,0248	0,6424
B3d	10,671	0,77	0,4440	0,5385	0,0962	0,4423
B3e	12,819	0,69	0,3417	0,4858	0,1254	0,3604

Tabla 37. Corrección del caudal teórico con sistema de frenado en bomba de mecate motorizada

2. Caudales teniendo en cuenta calibración del contador volumétrico

Código	f (Hz)	$Q_{\text{exp}} \text{ corrección}$ (l/s)	Q_{ideal} (l/s)	$Q_{\text{pérdidas}}$ (l/s)	$Q_{\text{teórico}}$ (l/s)
Usuario A	0,37	0,0710	0,2575	0,1920	0,0655
Usuario A	0,47	0,1159	0,3278	0,1920	0,1358
Usuario A	0,50	0,1253	0,3512	0,1920	0,1592
Usuario A	0,53	0,1514	0,3746	0,1920	0,1826
Usuario A	0,57	0,1775	0,3980	0,1796	0,2184
Usuario A	0,67	0,2875	0,4682	0,1385	0,3298
Usuario A	0,77	0,4292	0,5385	0,0974	0,4411
Usuario A	0,87	0,5458	0,6087	0,0563	0,5524
Usuario A	0,97	0,6500	0,6789	0,0152	0,6637
Usuario B	0,47	0,1159	0,3278	0,1920	0,1358
Usuario B	0,57	0,1817	0,3980	0,1796	0,2184
Usuario B	0,67	0,3000	0,4682	0,1385	0,3298
Usuario B	0,77	0,4333	0,5385	0,0974	0,4411
Usuario B	0,87	0,5417	0,6087	0,0563	0,5524
Usuario B	0,97	0,6500	0,6789	0,0152	0,6637

Tabla 38. Corrección del caudal teórico con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate manual

Código	f (Hz)	$Q_{\text{exp}} \text{ corrección}$ (l/s)	Q_{ideal} (l/s)	$Q_{\text{pérdidas}}$ (l/s)	$Q_{\text{teórico}}$ (l/s)
A1	0,34	0,0500	0,2400	0,1920	0,0480
A2	0,57	0,1941	0,4009	0,1778	0,2231
A3	0,64	0,3276	0,4477	0,1505	0,2973
A4	0,69	0,3875	0,4829	0,1299	0,3530
A5	0,81	0,4875	0,5707	0,0785	0,4921
A6	0,85	0,5333	0,5970	0,0631	0,5339
A7	0,89	0,5809	0,6263	0,0460	0,5802
A8	1,09	0,7375	0,7667	0,0000	0,7667
A9	1,17	0,8042	0,8223	0,0000	0,8223
A10	1,26	0,8833	0,8838	0,0000	0,8838
A11	1,31	0,9167	0,9189	0,0000	0,9189
B1	0,41	0,0913	0,2897	0,1920	0,0977
B2	0,56	0,1798	0,3951	0,1813	0,2138
B3	0,67	0,3820	0,4712	0,1368	0,3344
B4	0,72	0,4208	0,5033	0,1179	0,3854
B5	0,87	0,5500	0,6116	0,0546	0,5570
B6	1,04	0,7095	0,7316	0,0000	0,7316
B7	1,19	0,8208	0,8370	0,0000	0,8370
B8	1,44	1,0083	1,0096	0,0000	1,0096

Tabla 39. Corrección del caudal teórico con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada

Código	h (m)	f (Hz)	$Q_{\text{exp correcc}}$ (l/s)	Q_{ideal} (l/s)	$Q_{\text{pérdidas}}$ (l/s)	$Q_{\text{teórico}}$ (l/s)
A1a	4,200	0,89	0,5809	0,6263	0,0460	0,5802
A1b	6,376	0,62	0,3060	0,4360	0,1573	0,2787
A1c	8,523	0,50	0,1378	0,3512	0,1920	0,1592
A1d	10,671	0,36	0,0620	0,2546	0,1920	0,0626
A1e	12,819	0,30	0,0271	0,2107	0,1920	0,0187
A2a	4,200	1,31	0,9167	0,9189	0,0000	0,9189
A2b	6,376	0,88	0,5726	0,6145	0,0529	0,5617
A2c	8,523	0,70	0,3583	0,4916	0,1248	0,3669
A2d	10,671	0,60	0,2439	0,4243	0,1641	0,2602
A2e	12,819	0,48	0,1332	0,3395	0,1920	0,1475
A3b	6,376	1,21	0,8465	0,8516	0,0000	0,8516
A3c	8,523	0,90	0,5537	0,6350	0,0409	0,5942
A3d	10,671	0,75	0,3992	0,5238	0,1059	0,4179
A3e	12,819	0,63	0,3061	0,4419	0,1539	0,2880
B1a	4,200	0,87	0,5500	0,6116	0,0546	0,5570
B1b	6,376	0,63	0,3125	0,4448	0,1522	0,2927
B1c	8,523	0,54	0,1736	0,3804	0,1898	0,1906
B1d	10,671	0,41	0,0990	0,2897	0,1920	0,0977
B1e	12,819	0,31	0,0409	0,2166	0,1920	0,0246
B2a	4,200	1,44	1,0083	1,0096	0,0000	1,0096
B2b	6,376	0,92	0,6157	0,6467	0,0340	0,6127
B2c	8,523	0,73	0,4208	0,5150	0,1111	0,4040
B2d	10,671	0,66	0,2833	0,4624	0,1419	0,3205
B2e	12,819	0,52	0,1563	0,3658	0,1984	0,1674
B3b	6,376	1,30	0,9004	0,9130	0,0000	0,9130
B3c	8,523	0,95	0,6458	0,6672	0,0220	0,6452
B3d	10,671	0,77	0,4440	0,5385	0,0974	0,4411
B3e	12,819	0,69	0,3417	0,4858	0,1282	0,3576

Tabla 40. Corrección del caudal teórico con caudal experimental corregido a bajas frecuencias con sistema de frenado en bomba de mecate motorizada

C. Potencias de trabajo

Código	W_e (W)	W_{M-R} (W)	$W_{\text{útil}}$ (W)
A1	31,5	----	3,926
A2	36,0	----	8,368
A3	43,2	----	13,473
A4	54,0	26,768	15,937
A5	59,4	31,844	20,049
A6	61,2	33,536	21,934
A7	63,0	35,228	23,891
A8	72,0	43,688	30,331
A9	75,6	47,072	33,073
A10	82,8	53,84	36,329
A11	90,0	60,608	37,699
B1	27,0	----	5,164
B2	34,2	----	7,834
B3	39,6	----	15,709
B4	54,0	26,768	17,307
B5	63,0	35,228	22,620
B6	68,4	40,304	29,181
B7	79,2	50,456	33,758
B8	90,0	60,608	41,468

Tabla 41. Potencias a altura constante (4,2 m) en bomba de mecate motorizada

Código	W_e (W)	W_{M-R} (W)	$W_{\text{útil}}$ (W)
A1a	63	35,228	23,891
A1b	63	35,228	19,106
A1c	63	35,228	13,215
A1d	63	35,228	10,885
A1e	63	35,228	9,937
A2a	90	60,608	37,699
A2b	90	60,608	35,748
A2c	90	60,608	29,907
A2d	90	60,608	25,486
A2e	90	60,608	19,629
A3b	117	85,988	52,845
A3c	117	85,988	46,214
A3d	117	85,988	41,711
A3e	117	85,988	38,425
B1a	63	35,228	22,620
B1b	63	35,228	19,509
B1c	63	35,228	15,649
B1d	63	35,228	13,932
B1e	63	35,228	11,506
B2a	90	60,608	41,468
B2b	90	60,608	38,438
B2c	90	60,608	35,123
B2d	90	60,608	29,606
B2e	90	60,608	21,785
B3b	117	85,988	56,213
B3c	117	85,988	53,902
B3d	117	85,988	46,393
B3e	117	85,988	42,887

Tabla 42. Potencias a diferentes alturas en bomba de mecate motorizada

D. Rendimientos

Código	η_v	μ_F	μ_b
A1	----	----	----
A2	----	----	----
A3	----	----	----
A4	0,8025	0,742	0,595
A5	0,8543	0,737	0,630
A6	0,8934	0,732	0,654
A7	0,9276	0,731	0,678
A8	0,9619	0,722	0,694
A9	0,9779	0,718	0,703
A10	0,9995	0,675	0,675
A11	0,9976	0,624	0,622
B1	----	----	----
B2	----	----	----
B3	----	----	----
B4	0,8361	0,773	0,647
B5	0,8992	0,714	0,642
B6	0,9698	0,747	0,724
B7	0,9807	0,682	0,669
B8	0,9987	0,685	0,684

Tabla 43. Rendimientos a altura constante (4,2 m) en bomba de mecate motorizada

Código	η_v	μ_F	μ_b
A1a	0,928	0,731	0,678
A1b	0,702	0,773	0,542
A1c	0,451	0,832	0,375
A1d	0,409	0,755	0,309
A1e	0,376	0,751	0,282
A2a	0,998	0,624	0,622
A2b	0,932	0,633	0,590
A2c	0,729	0,677	0,493
A2d	0,575	0,732	0,421
A2e	0,461	0,703	0,324
A3b	0,994	0,618	0,615
A3c	0,872	0,616	0,537
A3d	0,762	0,637	0,485
A3e	0,693	0,645	0,447
B1a	0,899	0,714	0,642
B1b	0,703	0,788	0,554
B1c	0,493	0,901	0,444
B1d	0,460	0,859	0,395
B1e	0,423	0,772	0,327
B2a	0,999	0,685	0,684
B2b	0,952	0,666	0,634
B2c	0,817	0,709	0,580
B2d	0,613	0,797	0,488
B2e	0,474	0,758	0,359
B3b	0,986	0,663	0,654
B3c	0,968	0,648	0,627
B3d	0,825	0,654	0,540
B3e	0,703	0,709	0,499

Tabla 44. Rendimientos a diferentes alturas en bomba de mecate motorizada

E. Fuerza de rozamiento

Código	F_{roz}
A1	----
A2	----
A3	----
A4	8,135
A5	8,343
A6	8,555
A7	8,599
A8	9,013
A9	9,162
A10	11,253
A11	14,116
B1	----
B2	----
B3	----
B4	6,853
B5	9,364
B6	7,938
B7	10,892
B8	10,747

Tabla 45. Fuerza de rozamiento a altura constante (4,2 m) en bomba de mecate motorizada

Código	F_{roz}
A1a	8,599
A1b	10,439
A1c	9,582
A1d	19,258
A1e	23,690
A2a	14,116
A2b	20,575
A2c	22,636
A2d	21,796
A2e	30,140
A3b	21,912
A3c	29,532
A3d	33,917
A3e	39,266
B1a	9,364
B1b	9,532
B1c	5,195
B1d	9,723
B1e	21,121
B2a	10,747
B2b	17,785
B2c	19,450
B2d	15,115
B2e	22,832
B3b	18,049
B3c	25,818
B3d	31,381
B3e	29,269

Tabla 46. Fuerza de rozamiento a diferentes alturas en bomba de mecate motorizada

IX. Representaciones gráficas

A. Caudal experimental frente a frecuencia

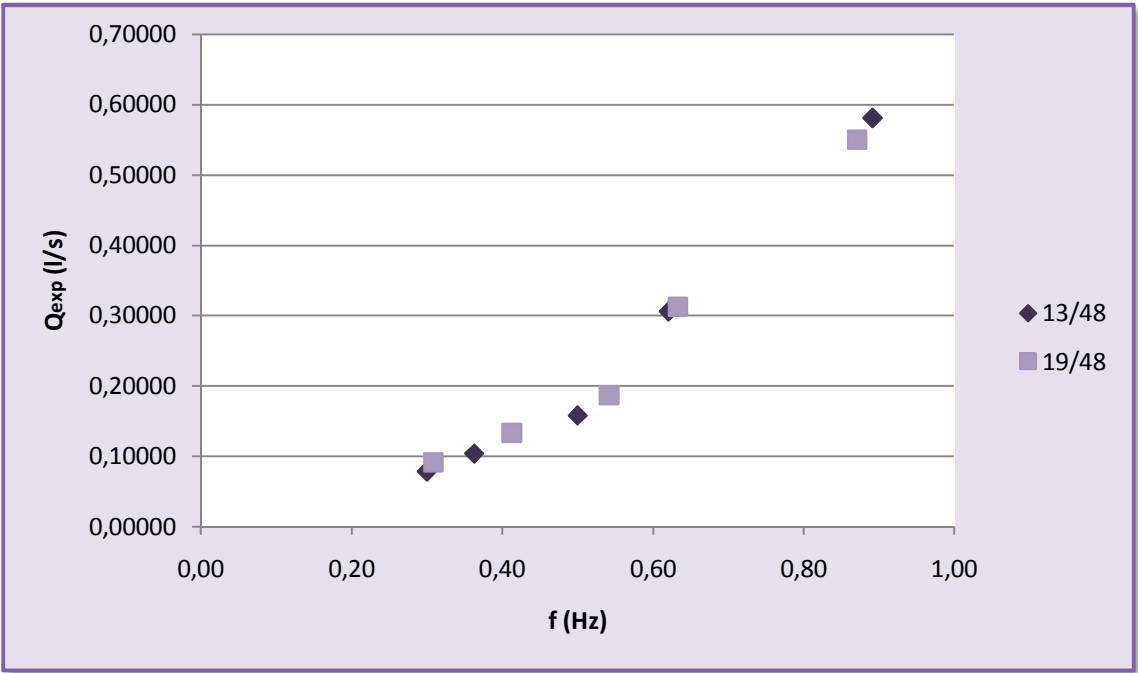


Figura 87. Caudal experimental frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (63W a diferentes alturas)

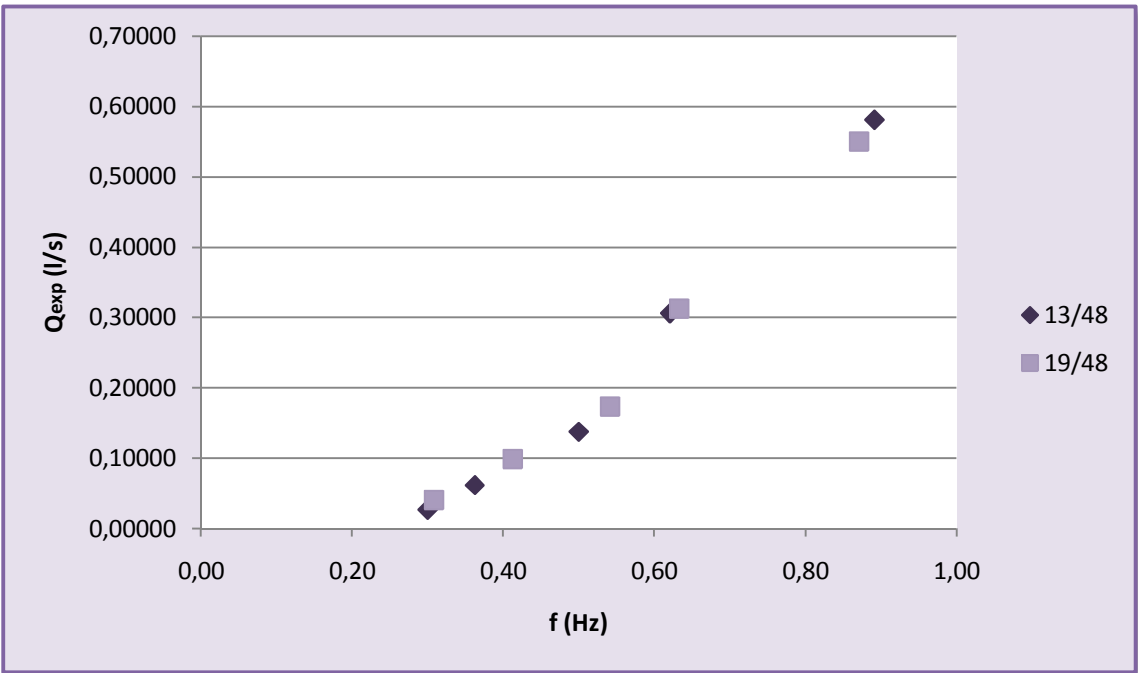


Figura 88. Caudal experimental corregido a bajas frecuencias frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (63W a diferentes alturas)

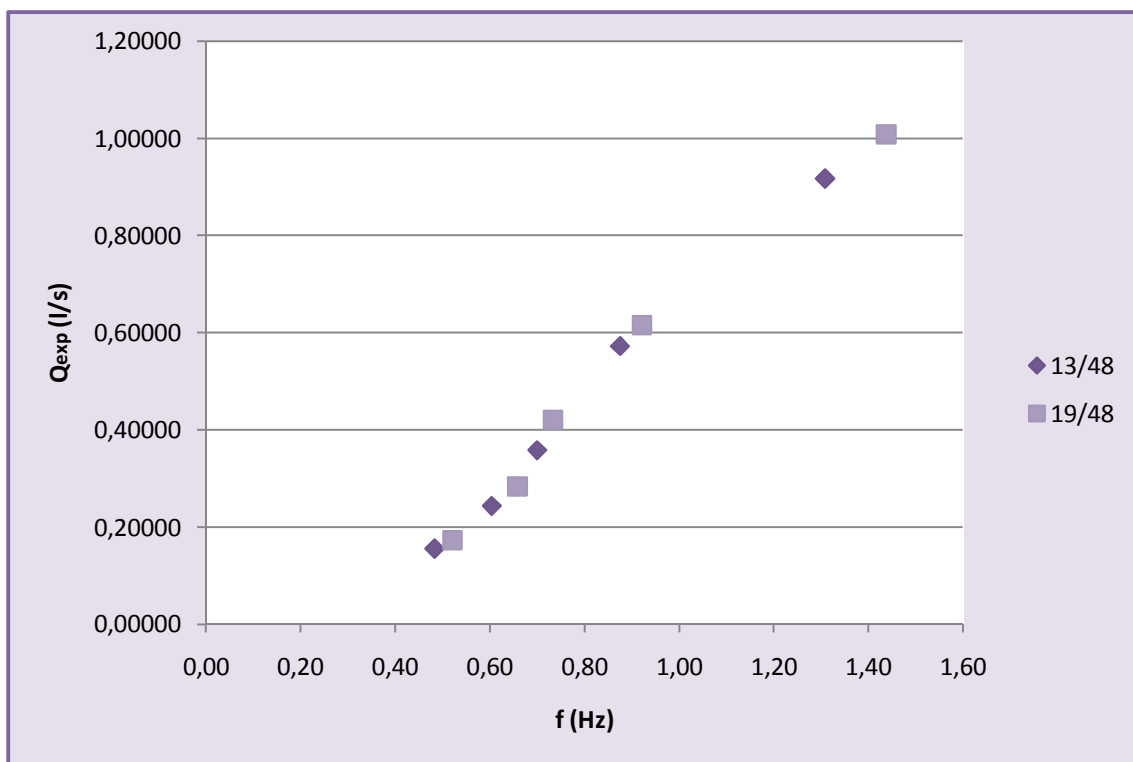


Figura 89. Caudal experimental frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (90W a diferentes alturas)

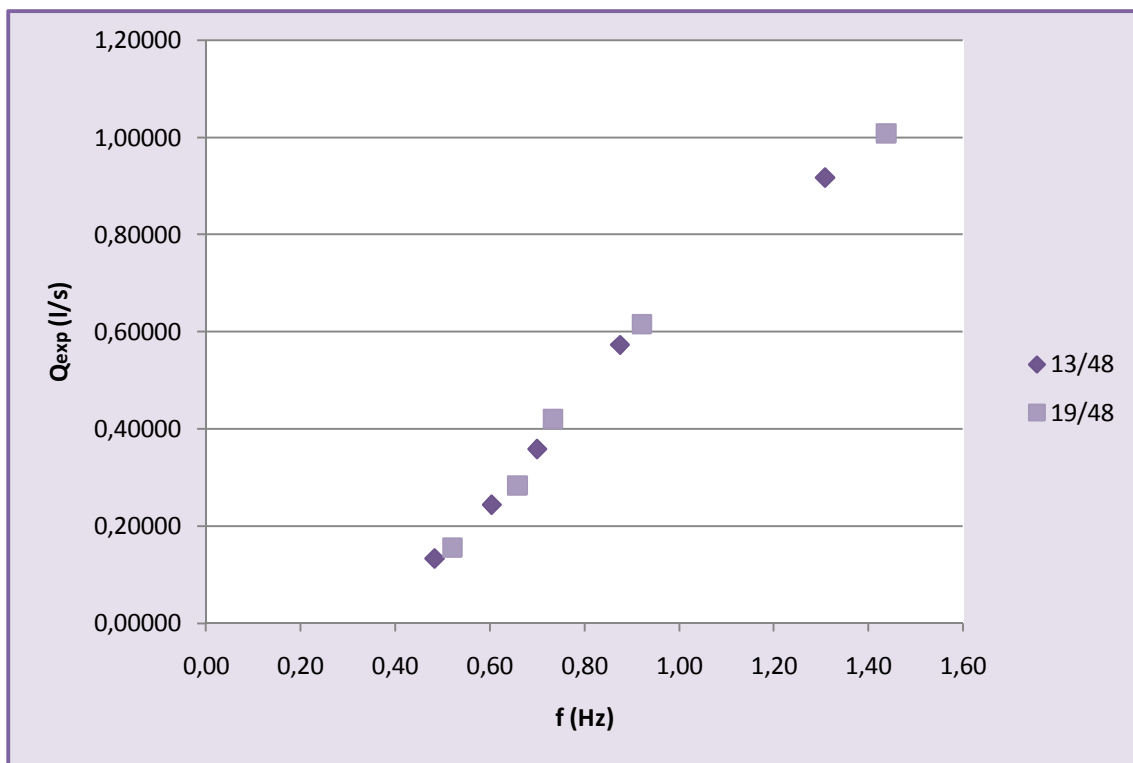


Figura 90. Caudal experimental corregido a bajas frecuencias frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (90W a diferentes alturas)

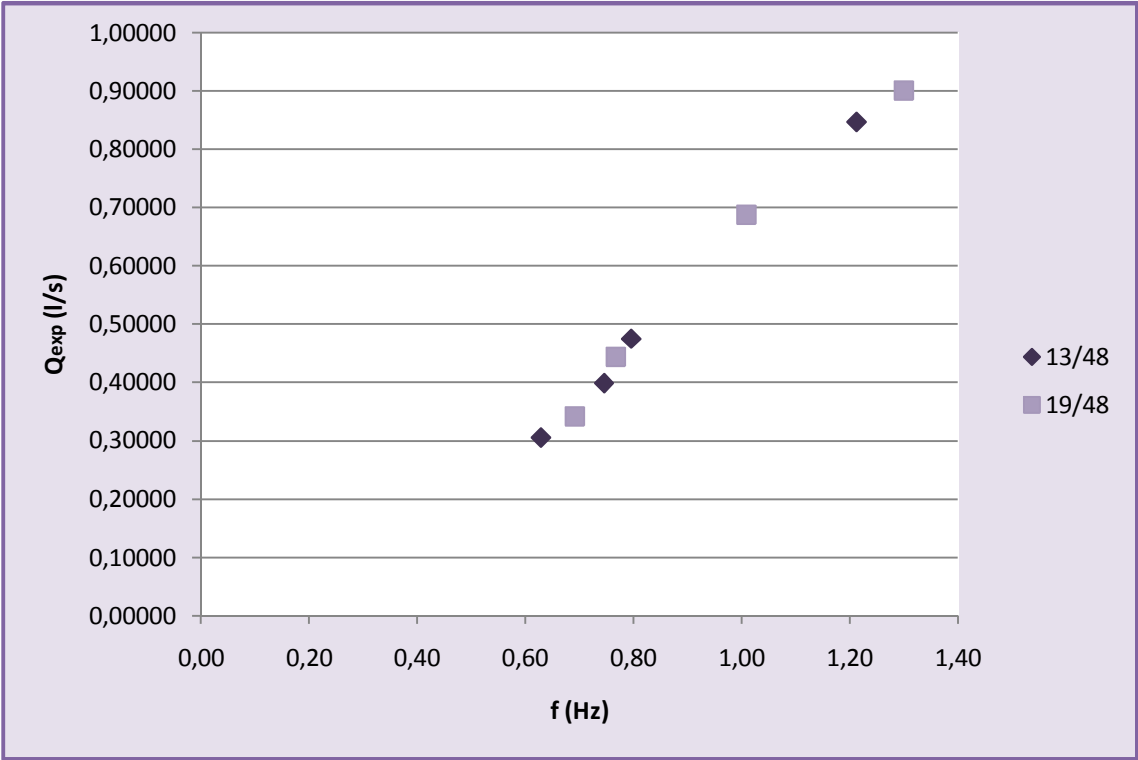


Figura 91. Caudal experimental frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (117W a diferentes alturas)

B. Caudal experimental frente a altura

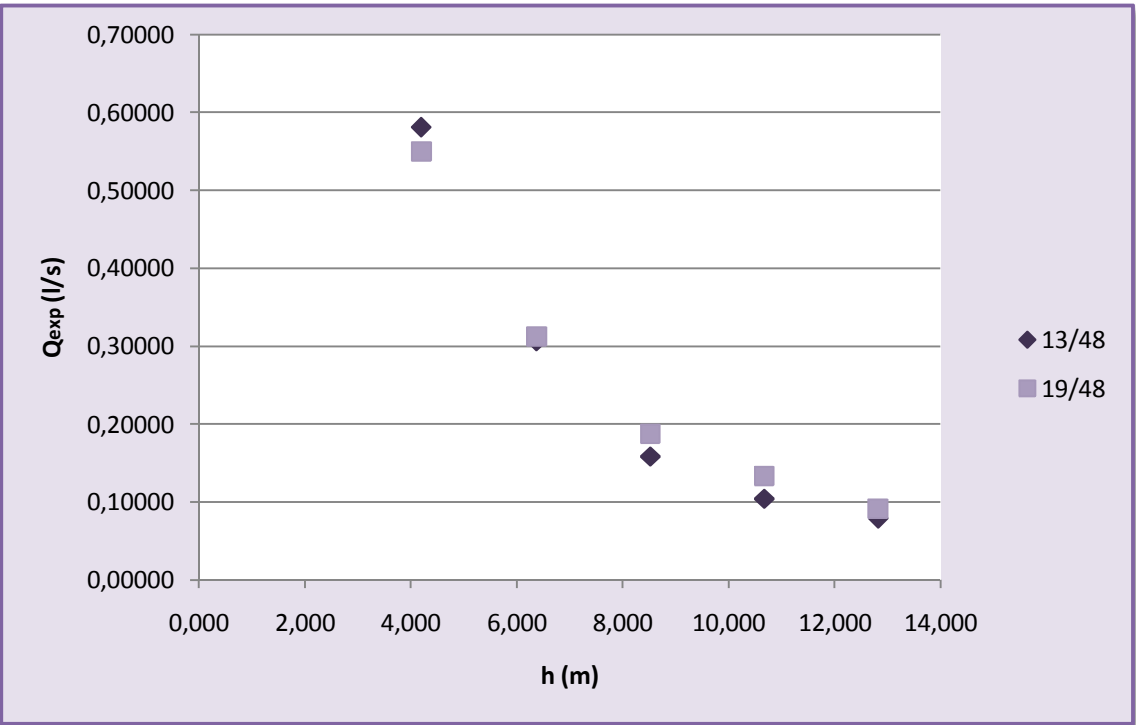


Figura 92. Caudal experimental frente a altura para potencia eléctrica constante (63W)

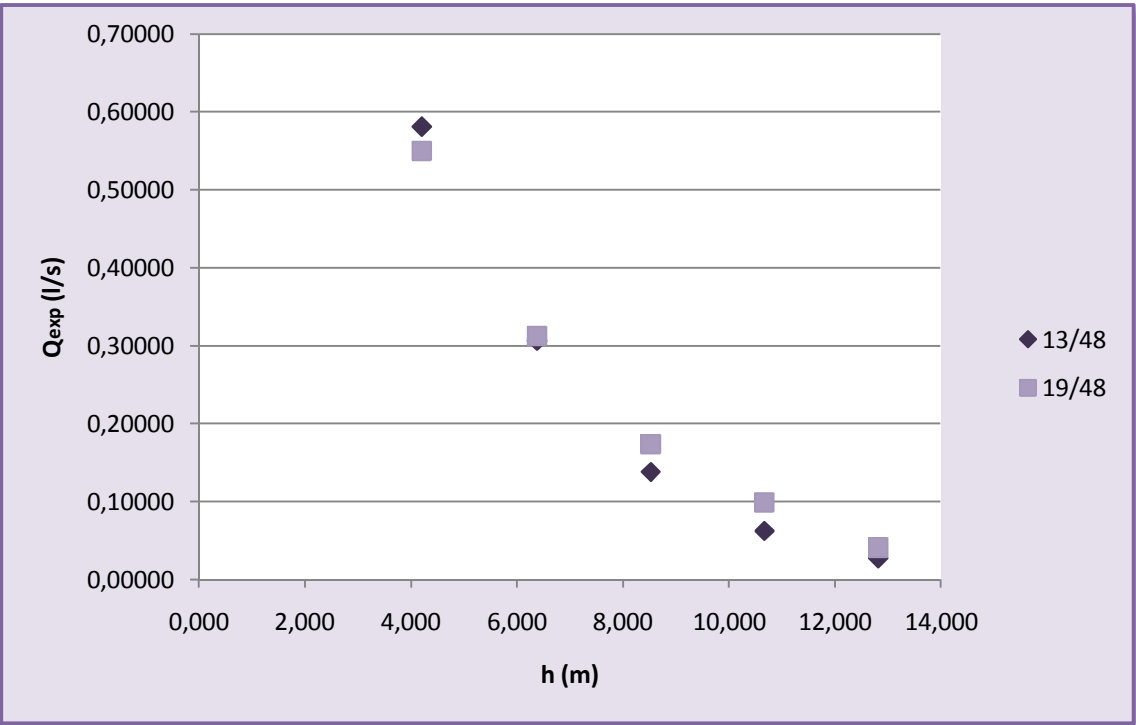


Figura 93. Caudal experimental corregido a bajas frecuencias frente a altura para potencia eléctrica constante (63W)

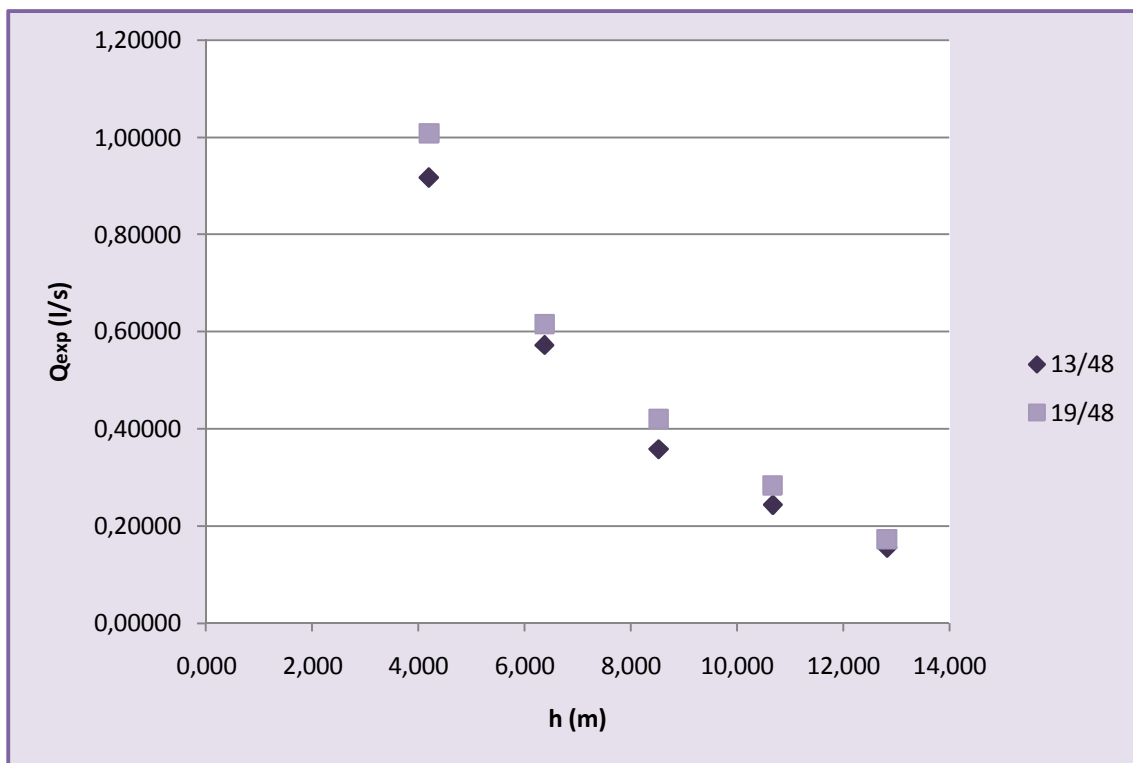


Figura 94. Caudal experimental frente a altura para potencia eléctrica constante (90W)

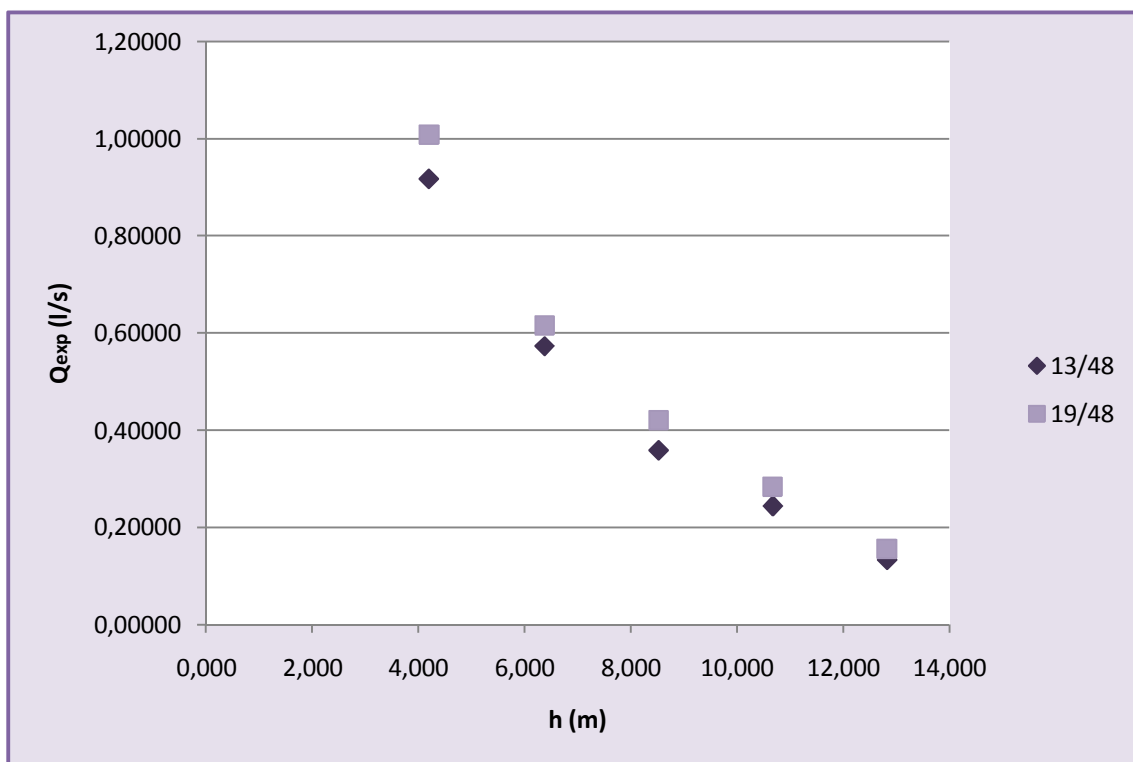


Figura 95. Caudal experimental corregido a bajas frecuencias frente a altura para potencia eléctrica constante (90W)

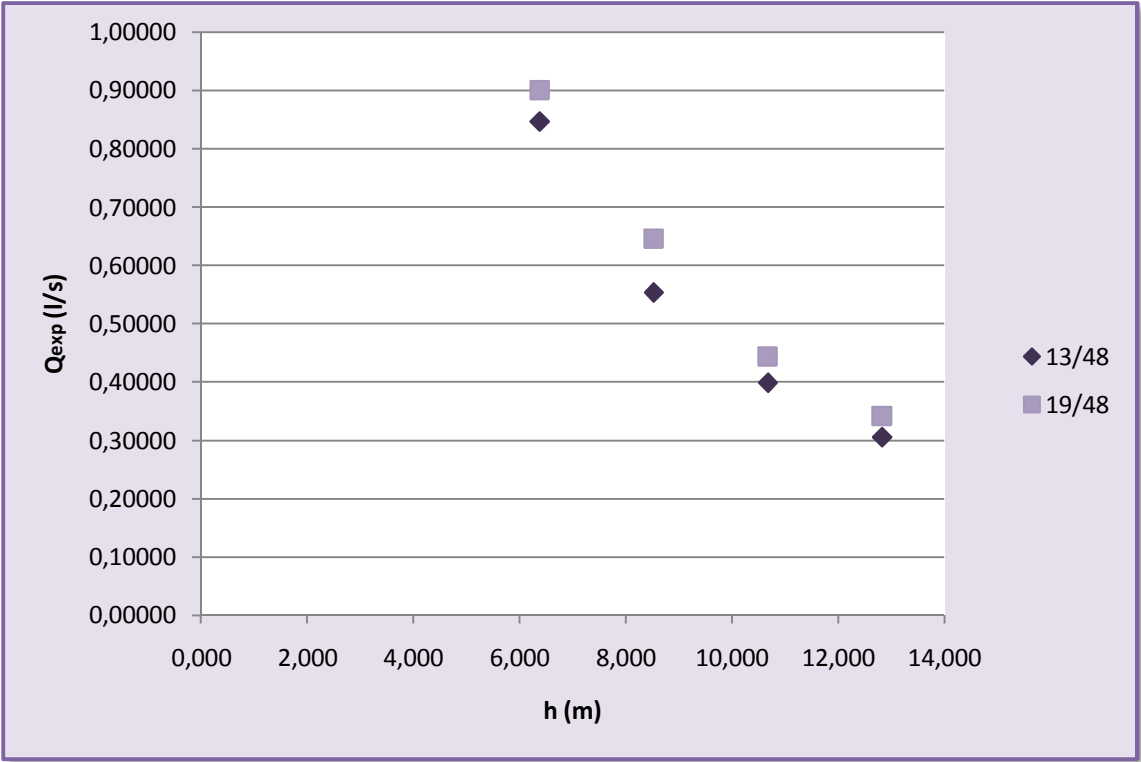


Figura 96. Caudal experimental frente a altura para potencia eléctrica constante (117W)

C. Comparación caudal teórico ideal frente a experimental

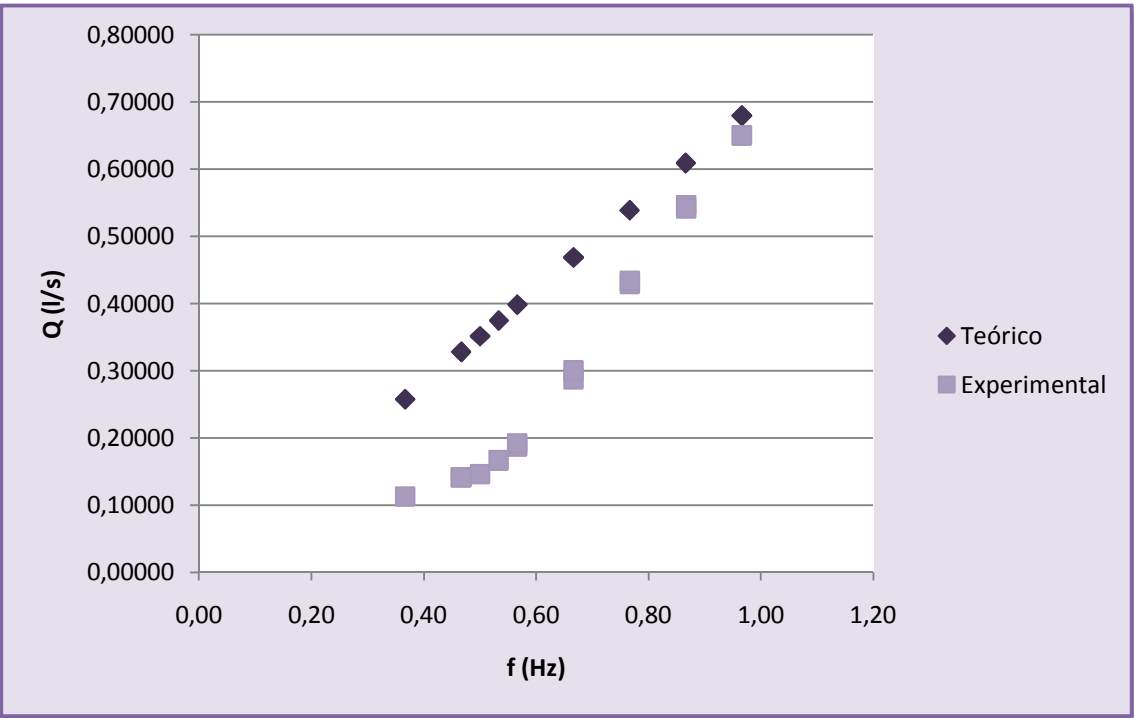


Figura 97. Comparación caudal teórico ideal y experimental frente a frecuencia en bomba de mecate manual

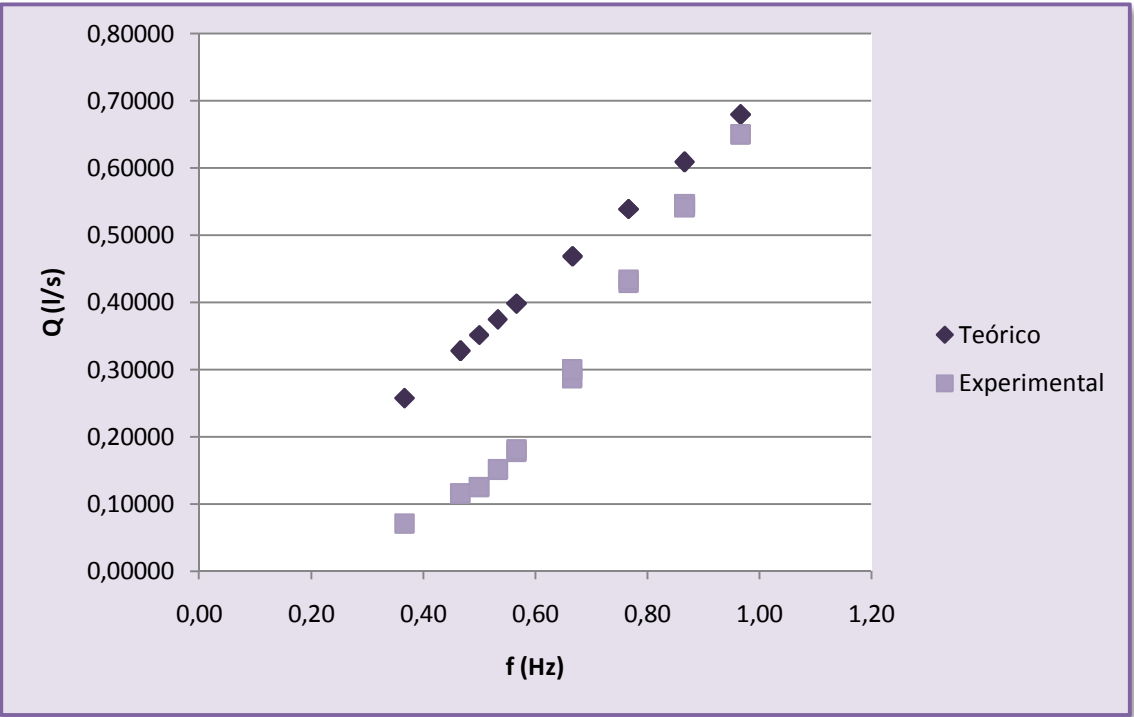


Figura 98. Comparación caudal teórico ideal y experimental corregido a bajas frecuencias frente a frecuencia en bomba de mecate manual

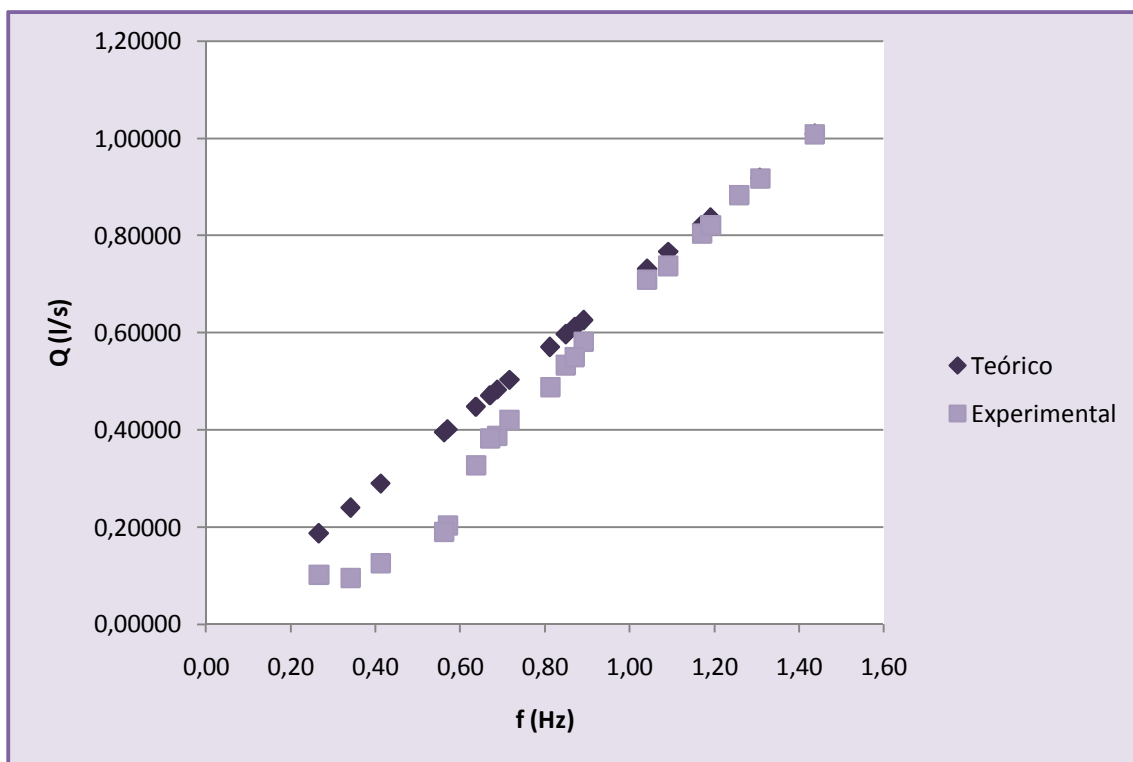


Figura 99. Comparación caudal teórico ideal y experimental frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada

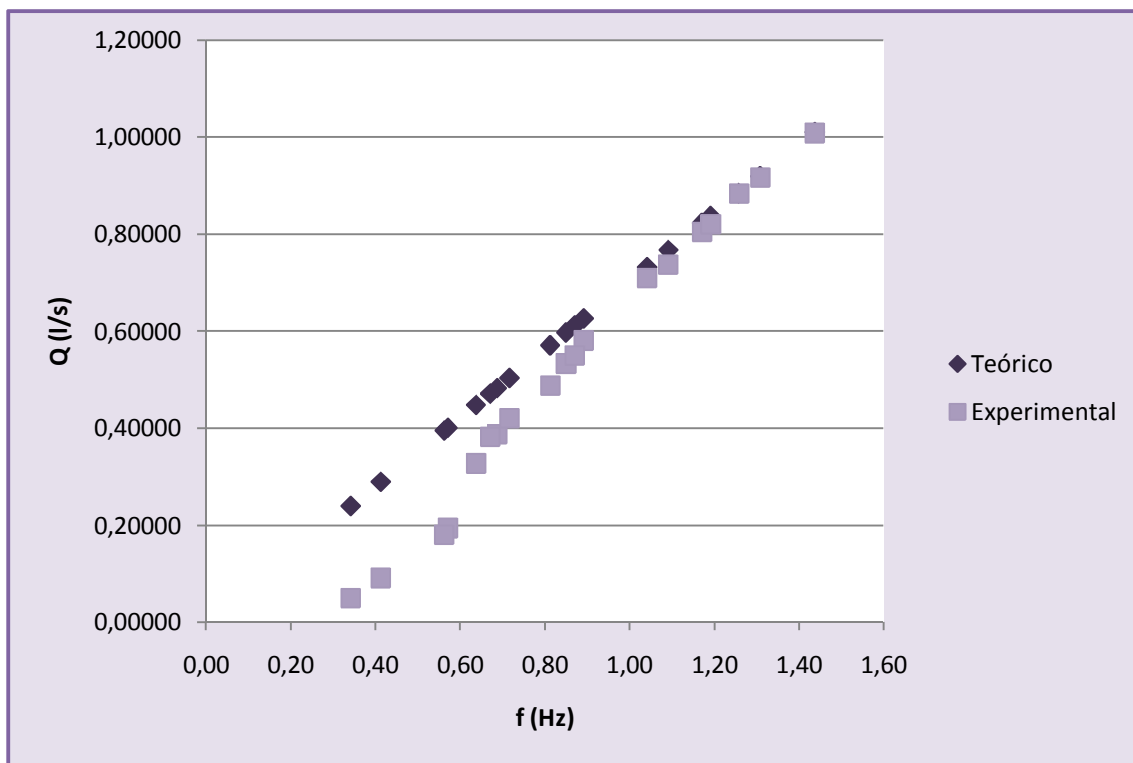


Figura 100. Comparación caudal teórico ideal y experimental corregido a bajas frecuencias frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada

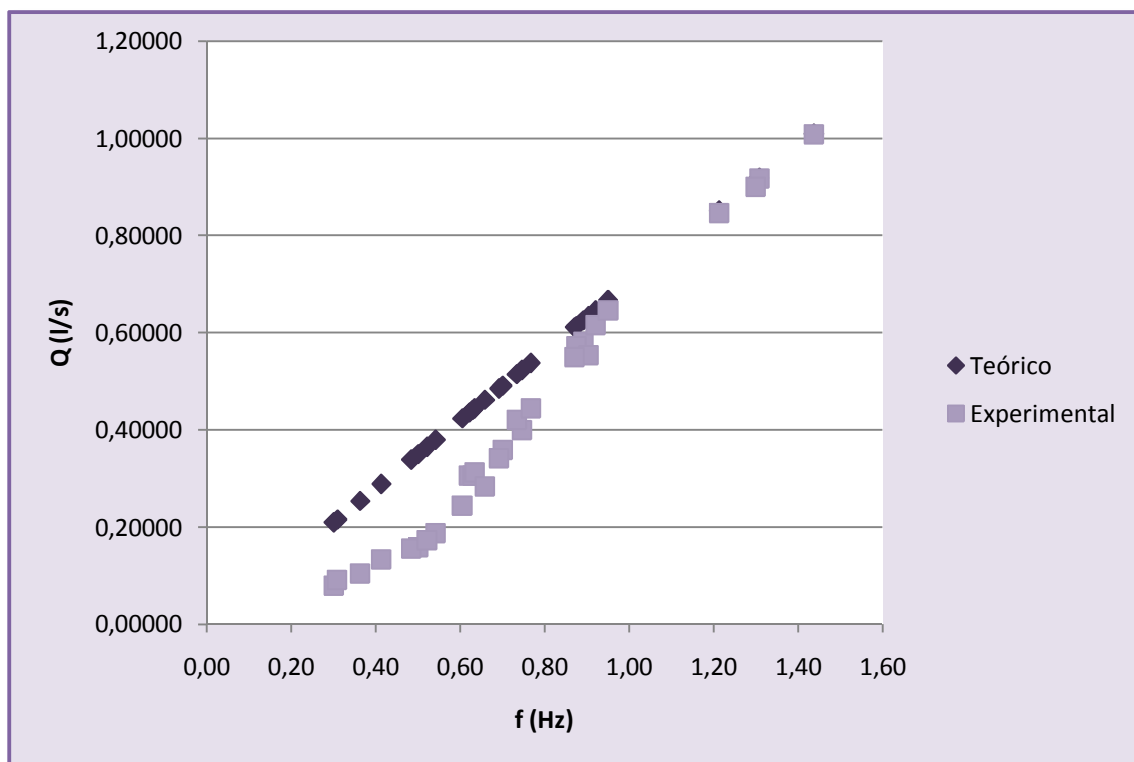


Figura 101. Comparación caudal teórico ideal y experimental frente a frecuencia en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)

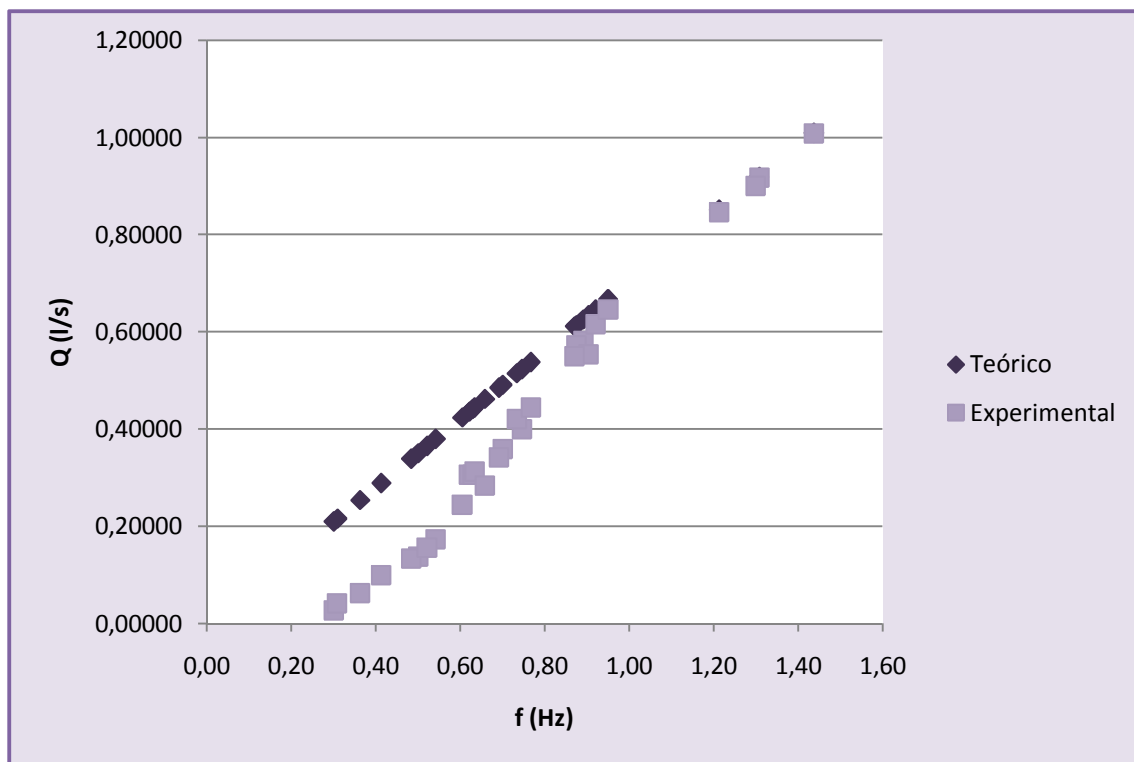


Figura 102. Comparación caudal teórico ideal y experimental corregido a bajas frecuencias frente a frecuencia en bomba de mecate manual (distintas alturas)

D. Caudal de pérdidas

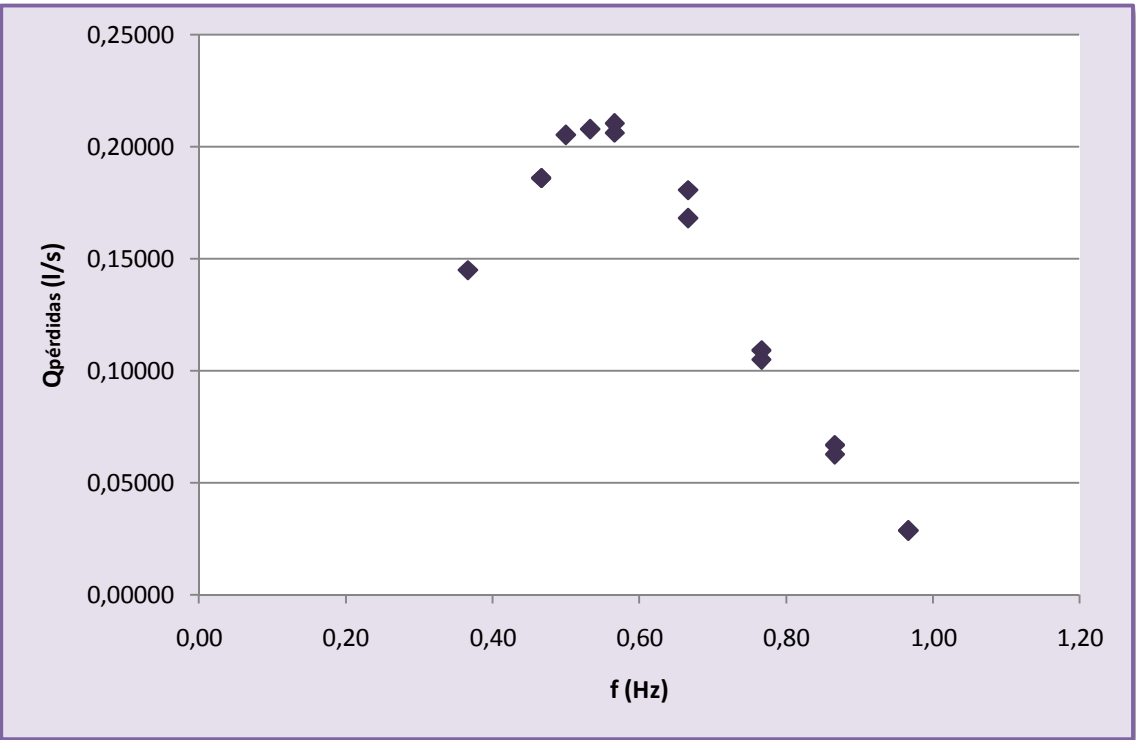


Figura 103. Caudal de pérdidas en bomba de mecate manual

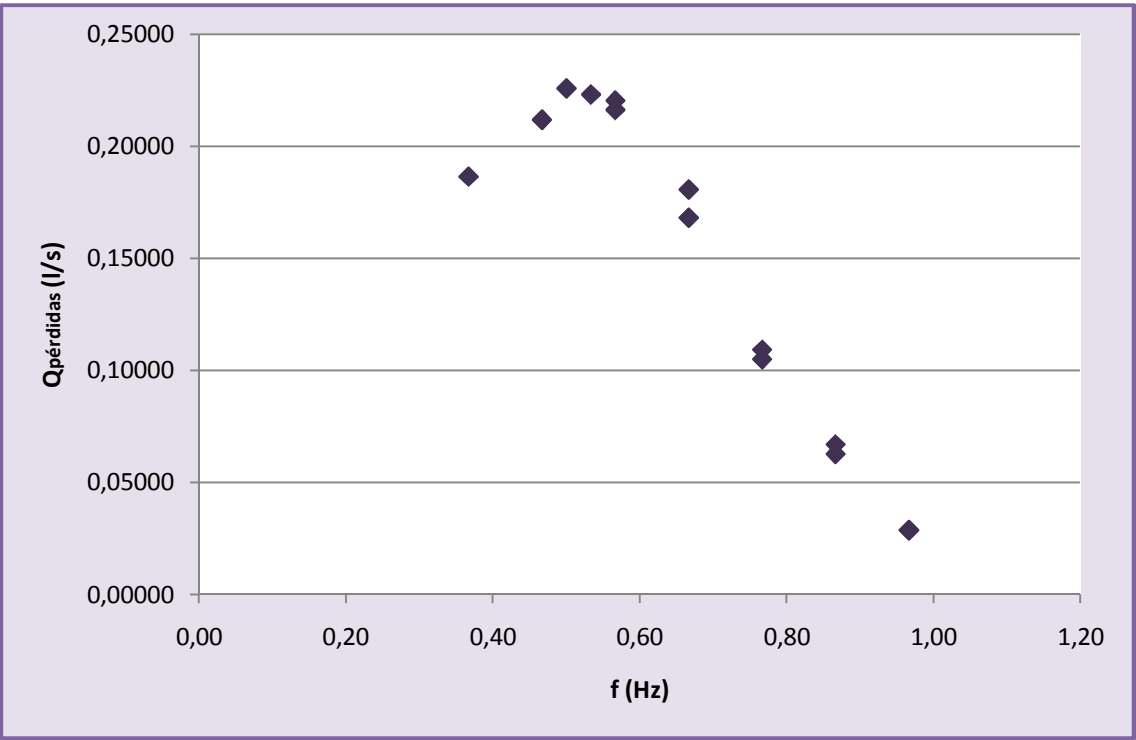


Figura 104. Caudal de pérdidas con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate manual

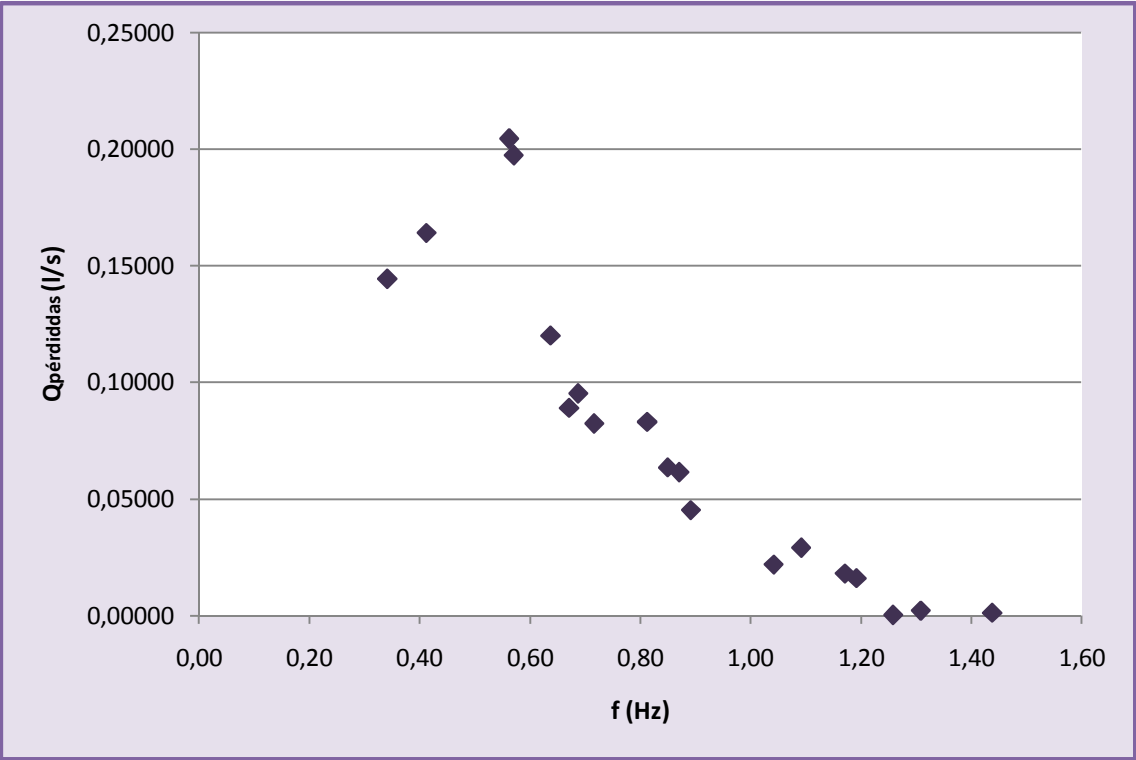


Figura 105. Caudal de pérdidas en bomba de mecate motorizada

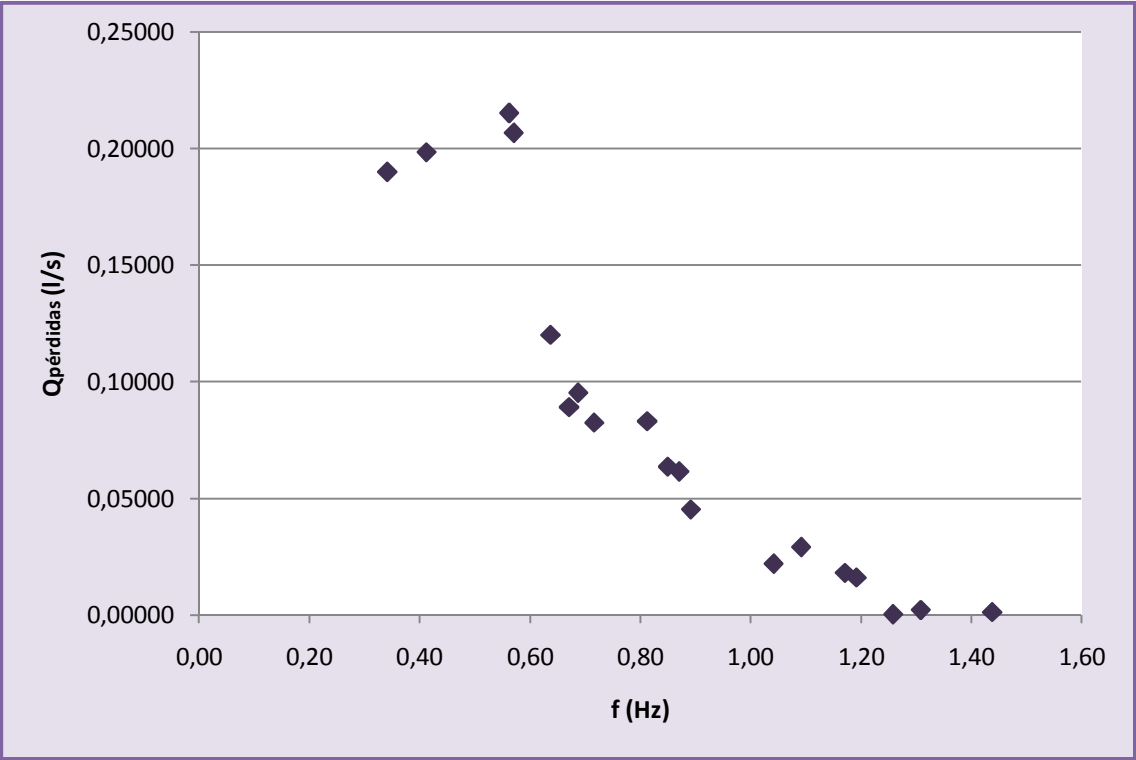


Figura 106. Caudal de pérdidas con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada

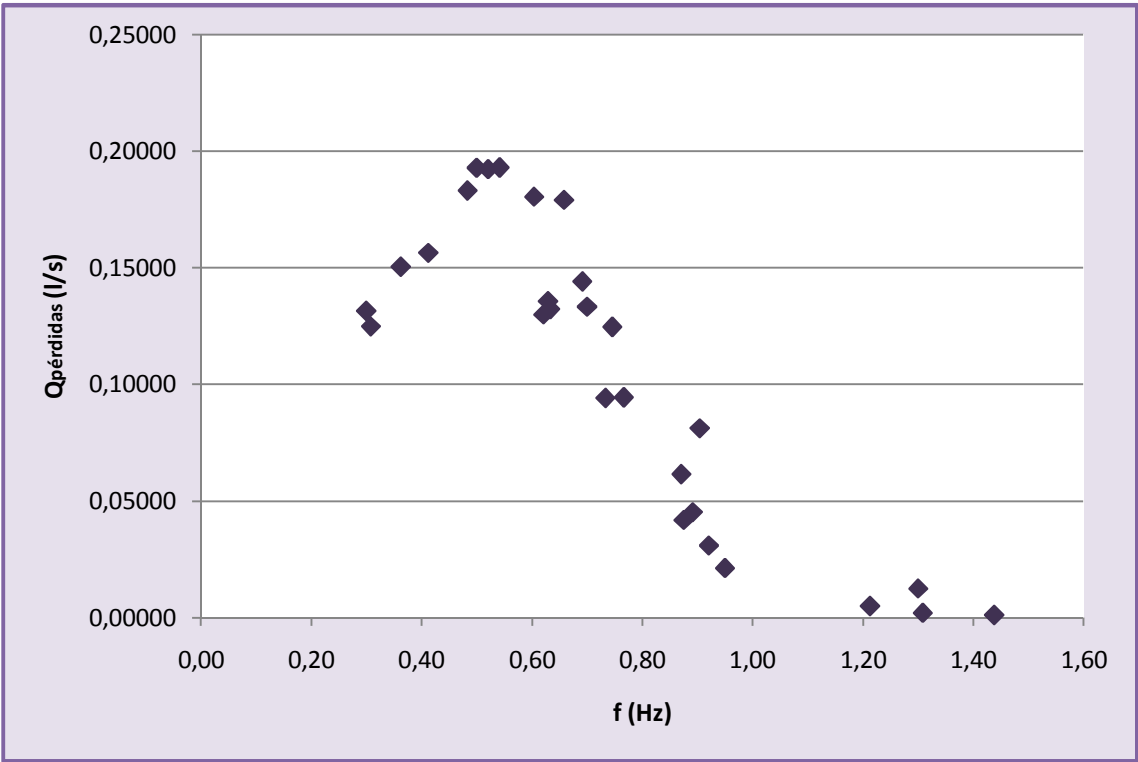


Figura 107. Caudal de pérdidas en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)

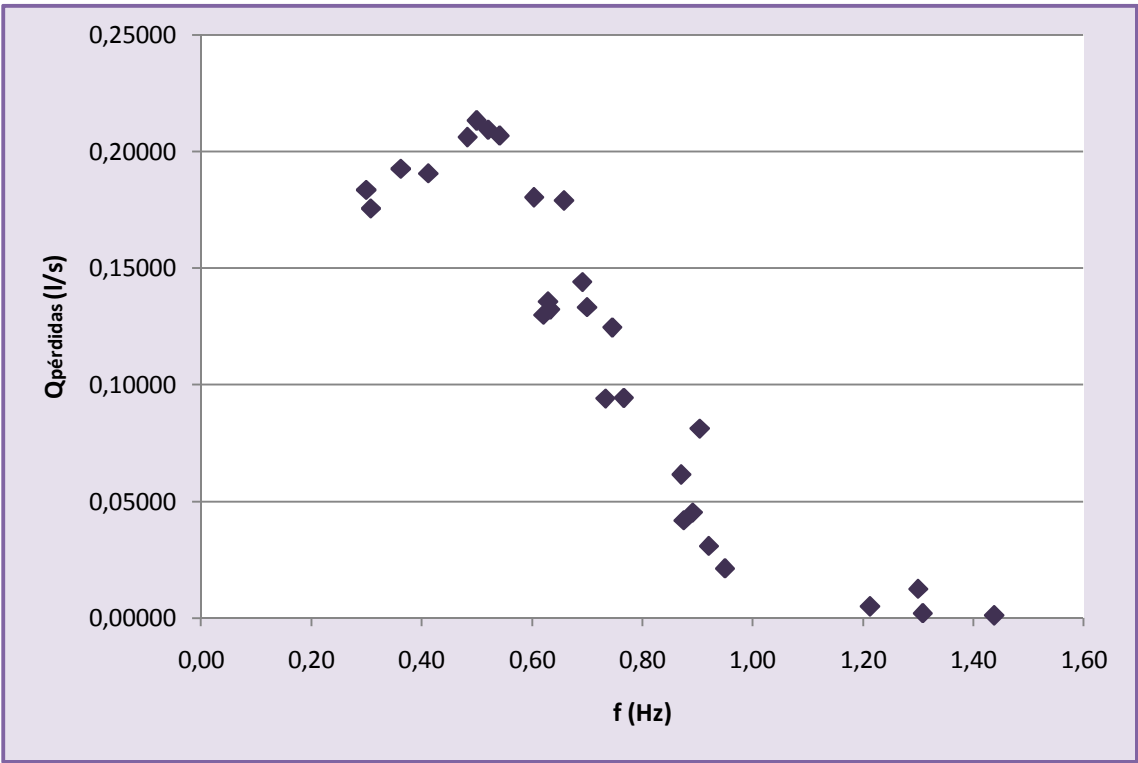


Figura 108. Caudal de pérdidas con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)

E. Comparación caudal teórico y experimental

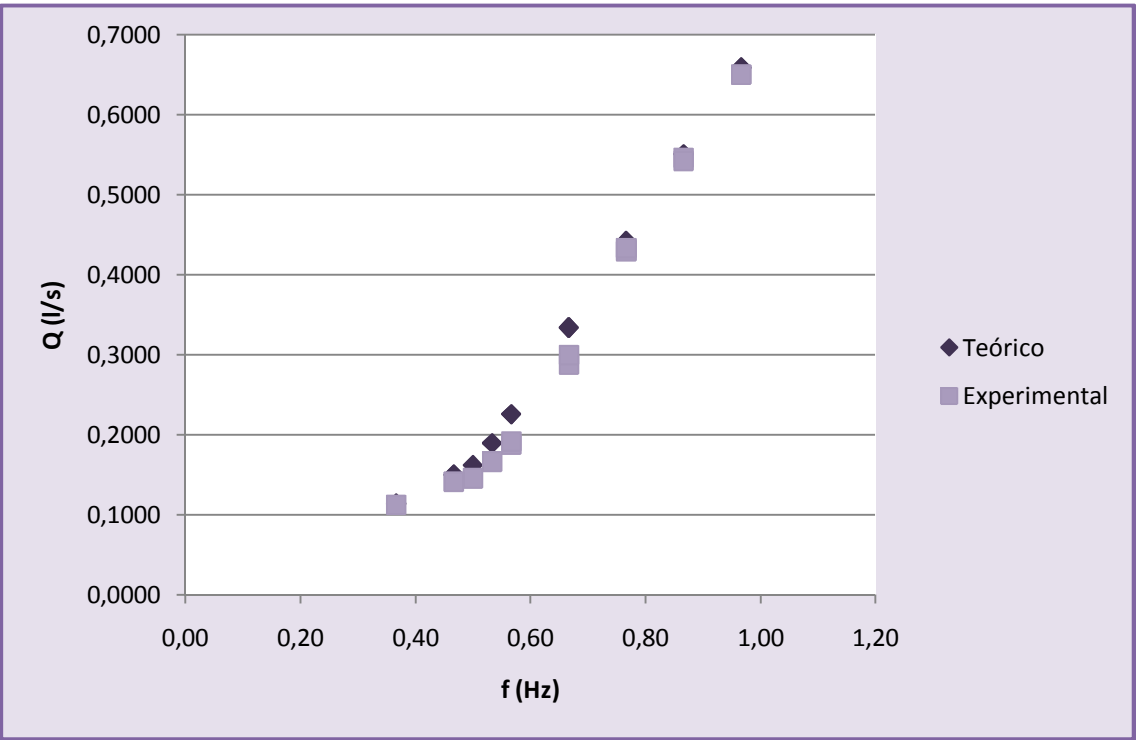


Figura 109. Comparación caudal teórico y experimental en bomba de mecate manual

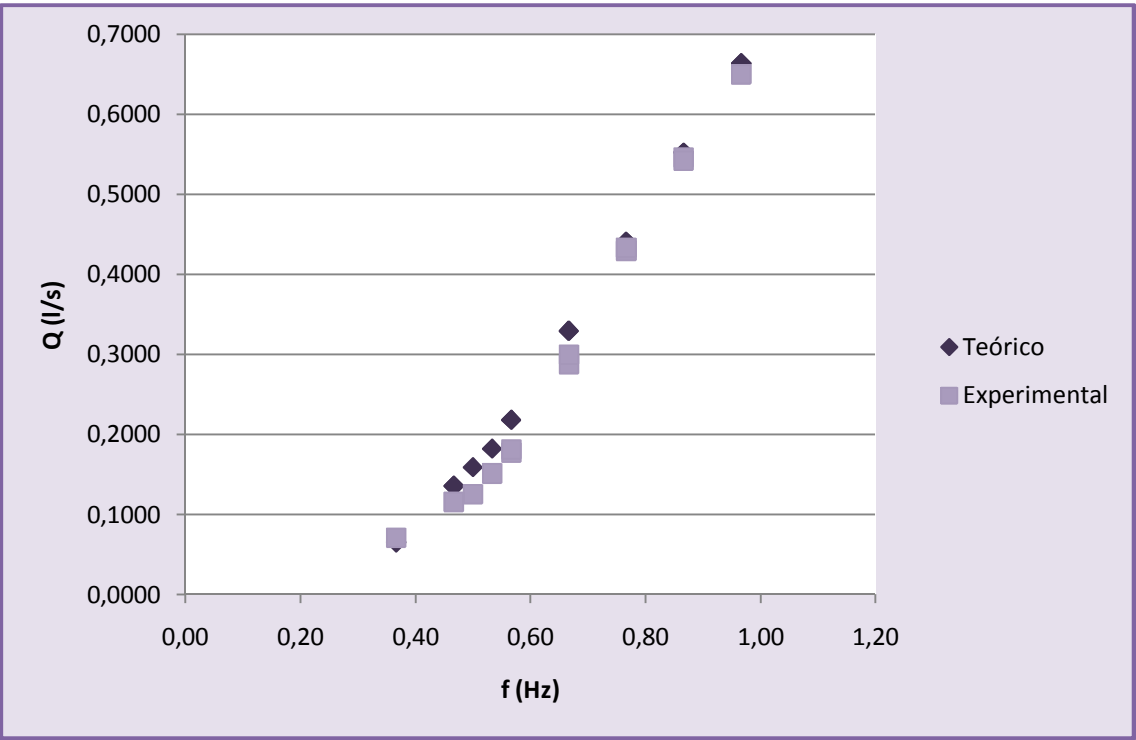


Figura 110. Comparación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate manual

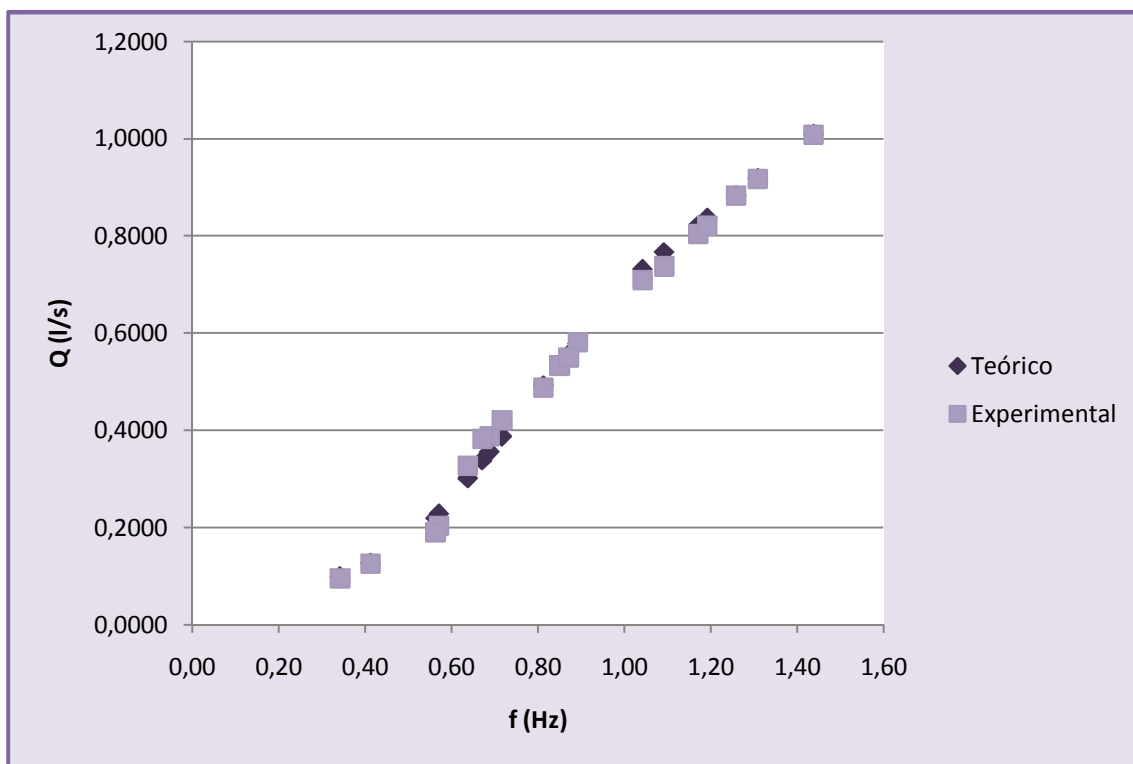


Figura 111. Comparación caudal teórico y experimental en bomba de mecate motorizada

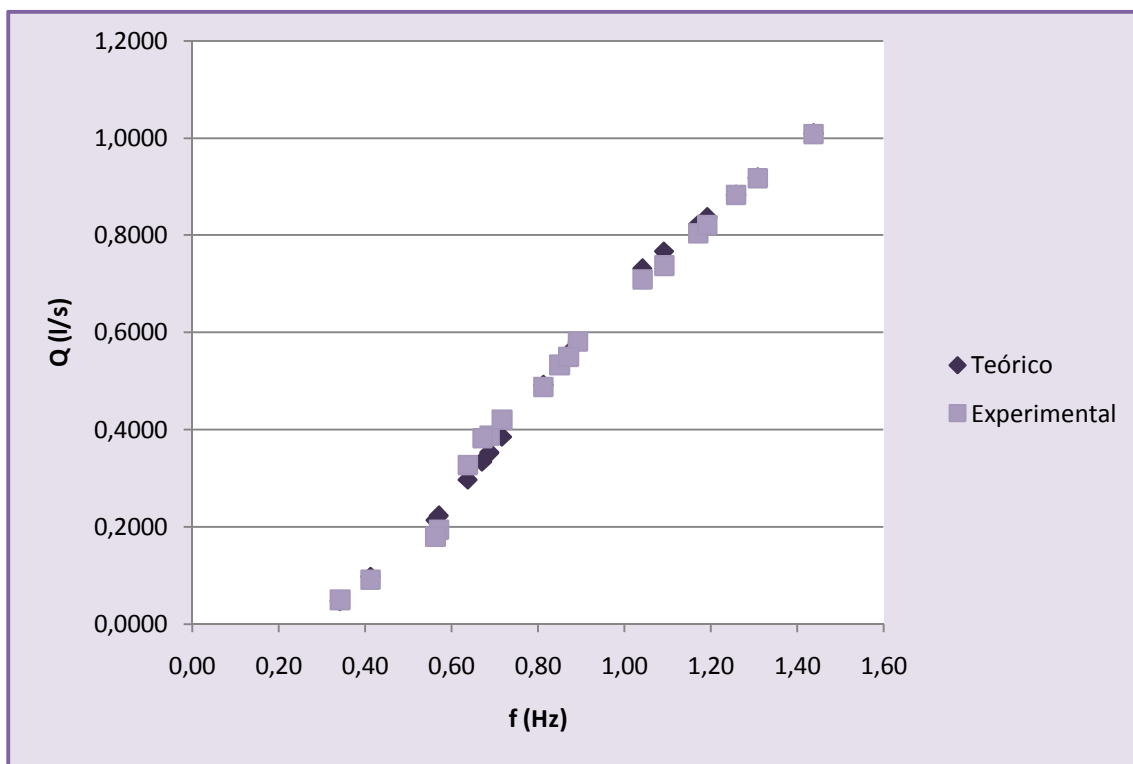


Figura 112. Comparación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada

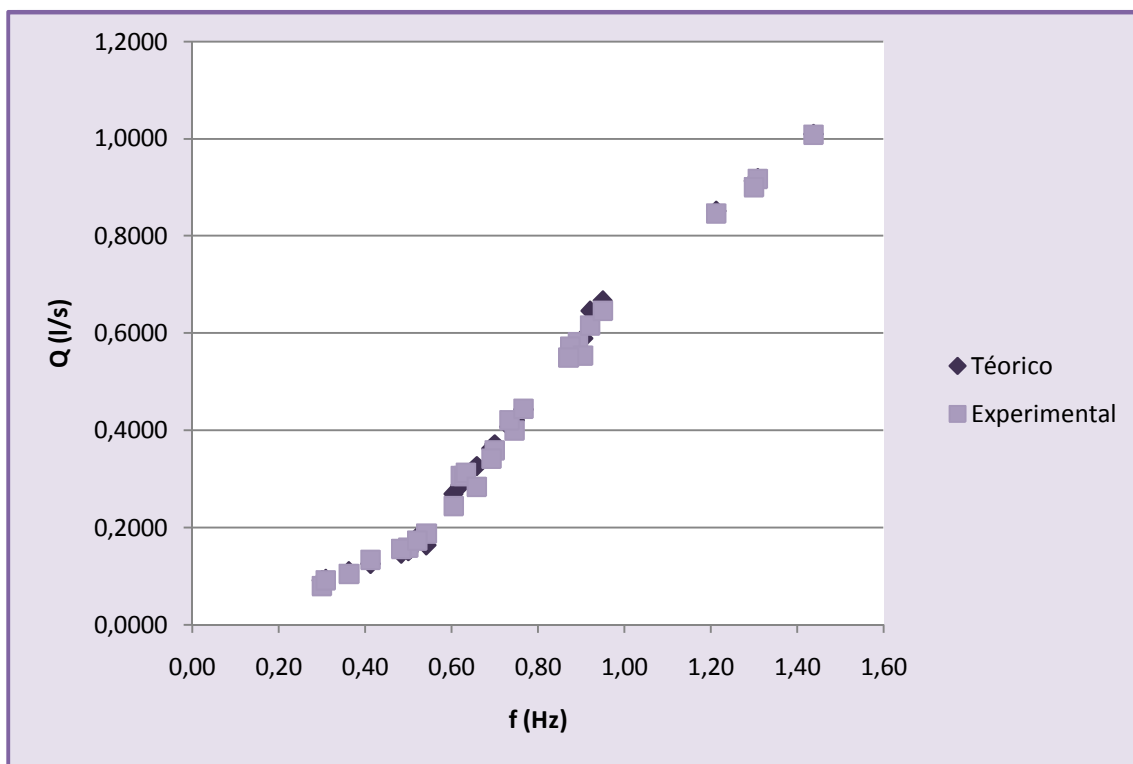


Figura 113. Comparación caudal teórico y experimental en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)

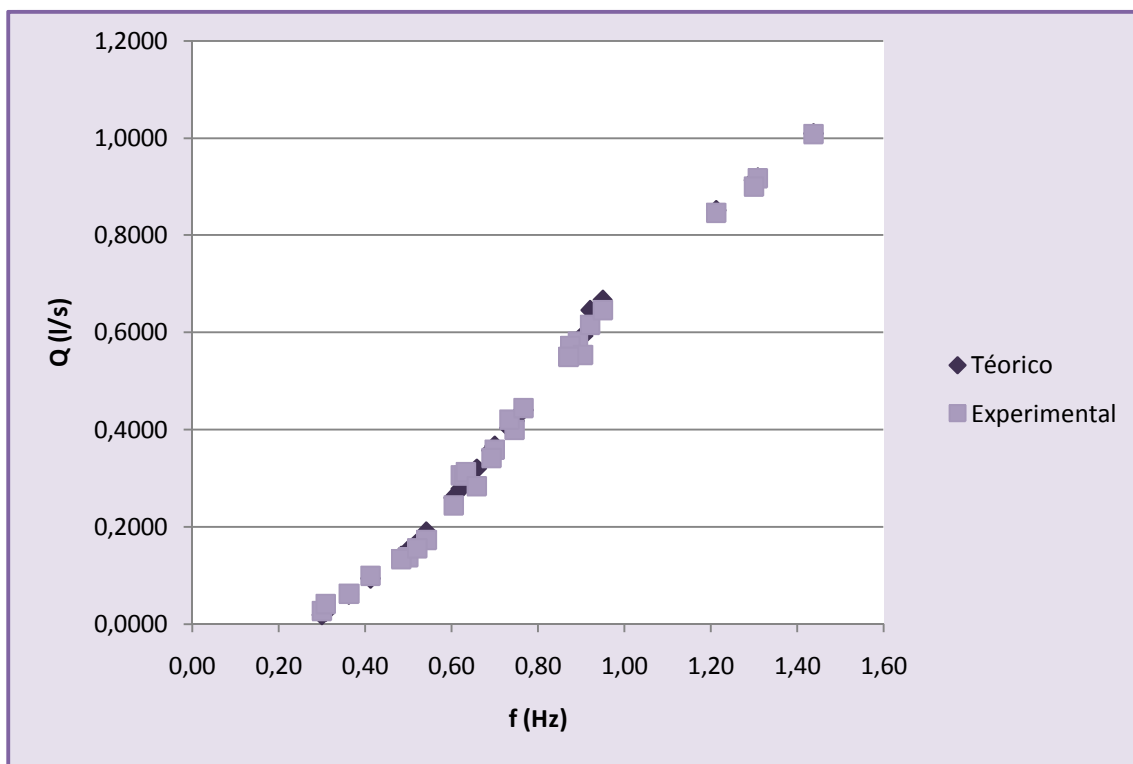


Figura 114. Comparación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)

F. Desviación entre el caudal teórico y experimental corregido

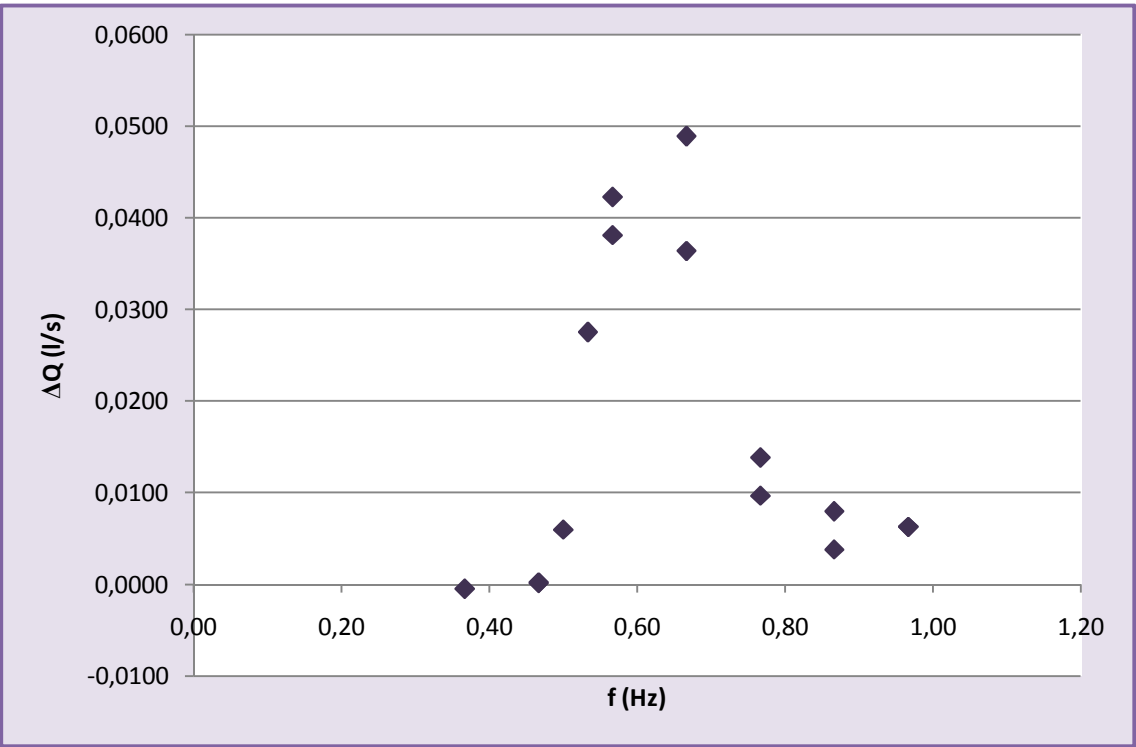


Figura 115. Desviación caudal teórico y experimental en bomba de mecate manual

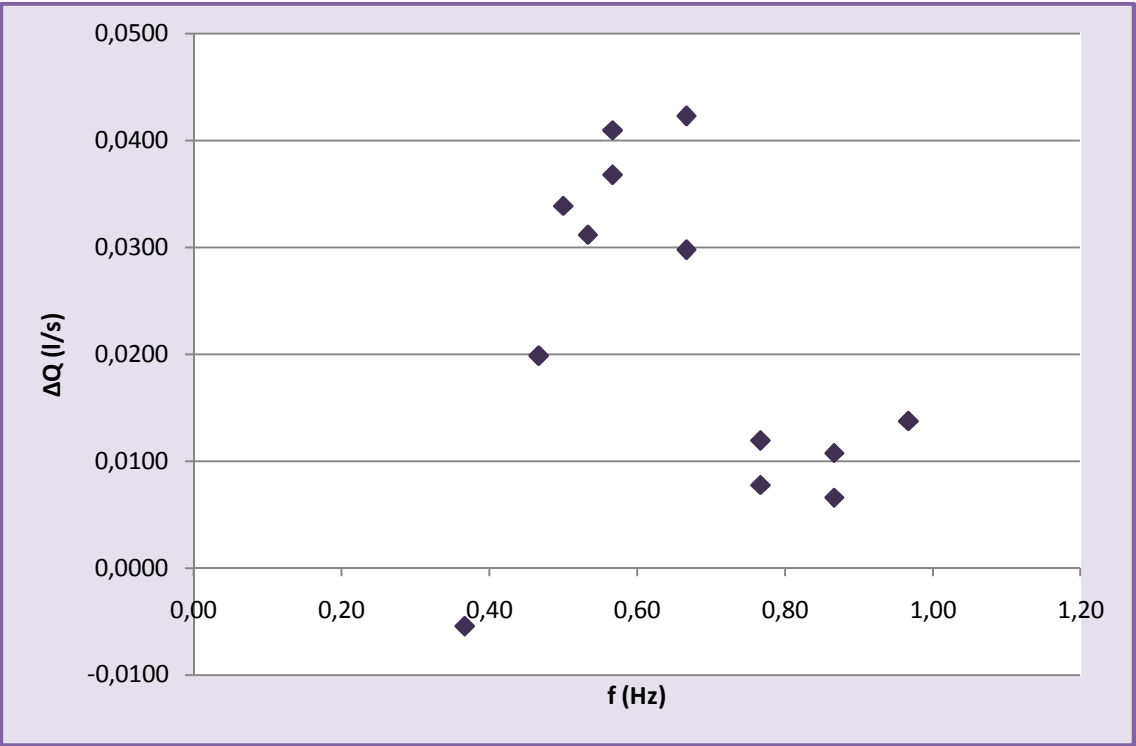


Figura 116. Desviación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate manual

Las gráficas de la Figura 115 y

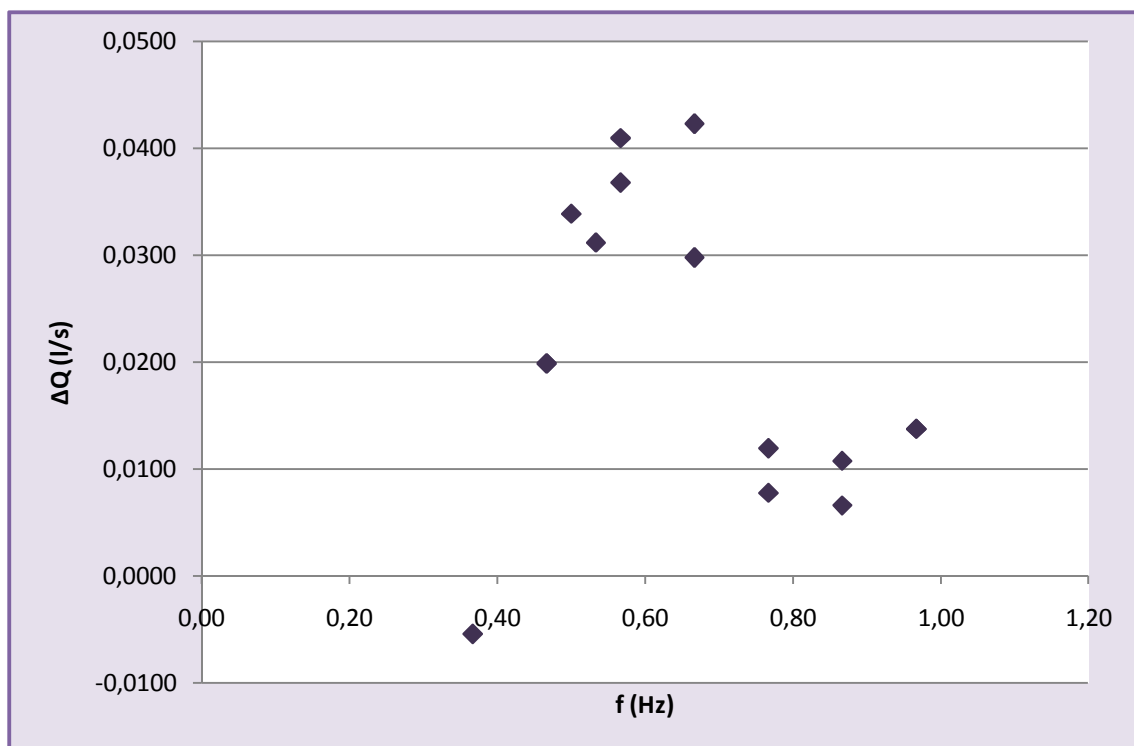


Figura 116 demuestran un error no muy fiable puesto que, la forma de extraer agua ha sido diferente, ya que se consideró el caudal de pérdidas calculado durante la configuración motorizada de la bomba de mecate. Al suceder esto el error con la configuración manual puede ser mayor debido a que el objeto de la prueba es un ser humano, el cual puede cometer errores para mantener la frecuencia constante durante las pruebas.

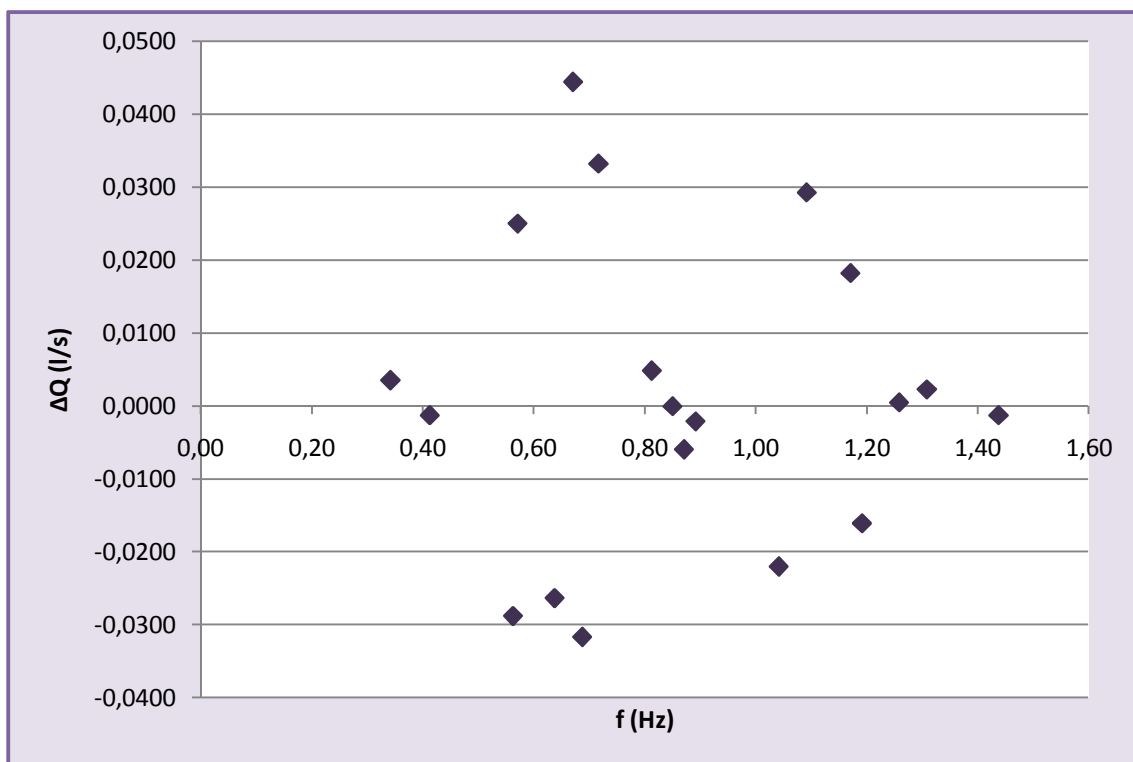


Figura 117. Desviación caudal teórico y experimental en bomba de mecate motorizada

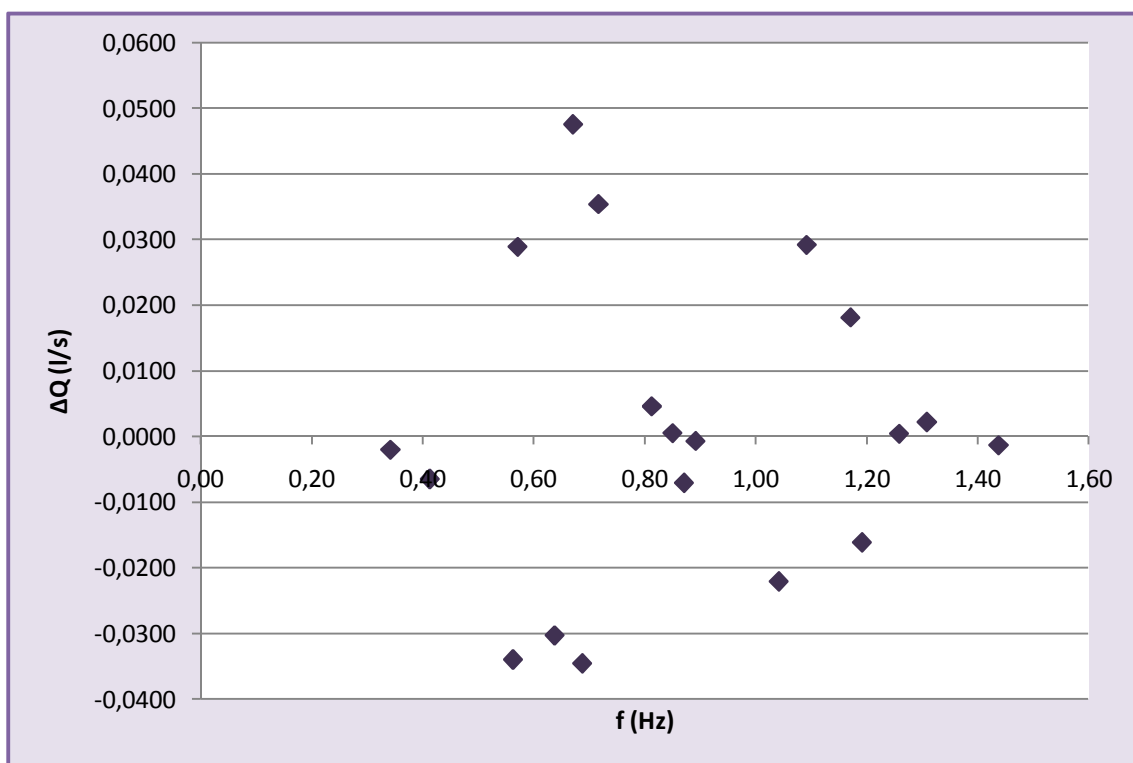


Figura 118. Desviación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada

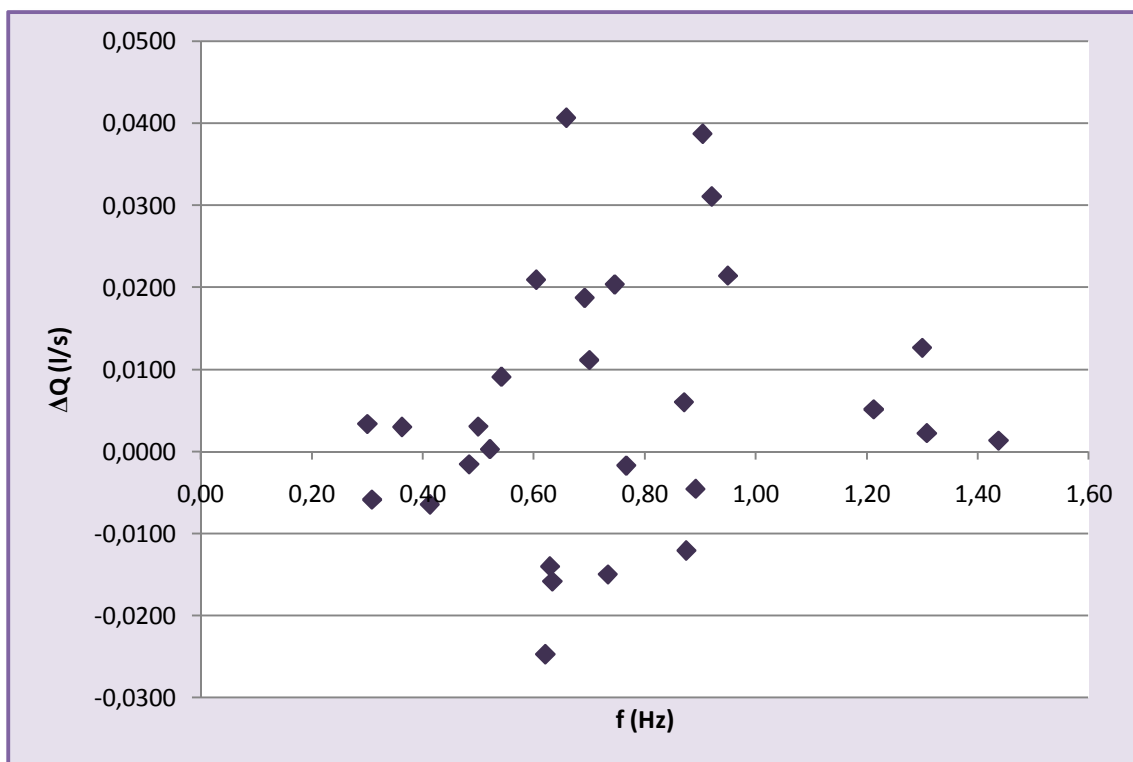


Figura 119. Desviación caudal teórico y experimental en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)

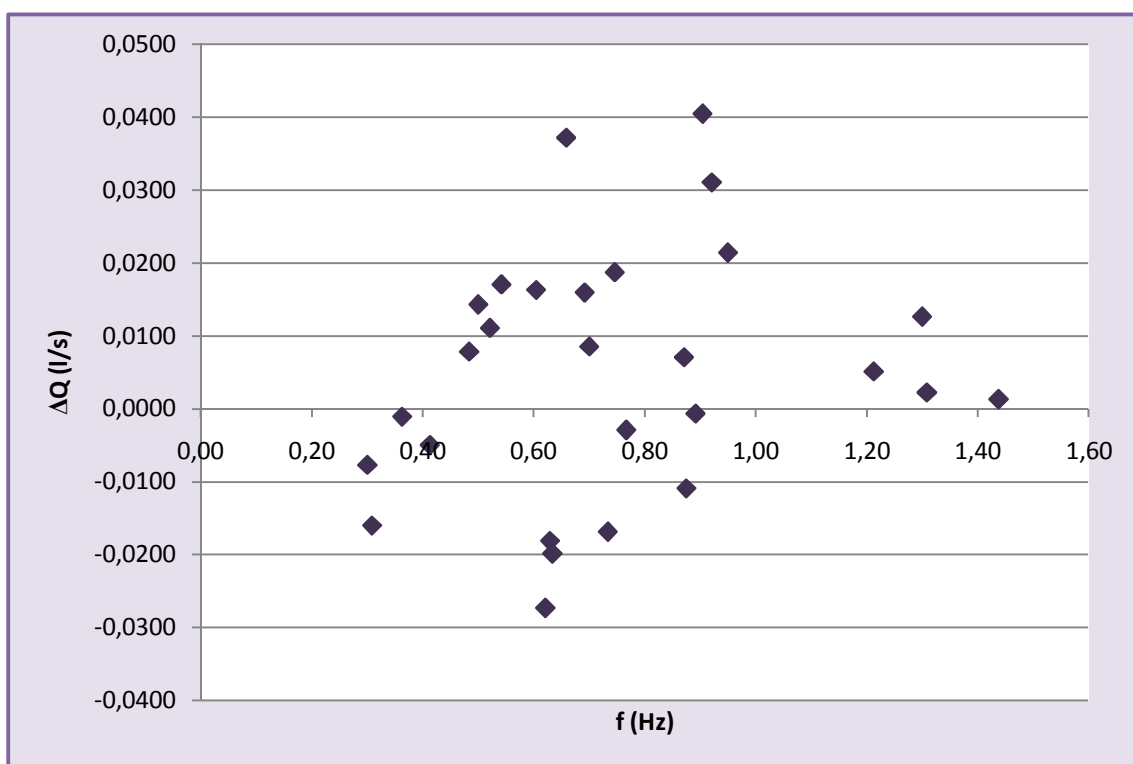


Figura 120. Desviación caudal teórico y experimental con caudal experimental corregido a bajas frecuencias en bomba de mecate motorizada (distintas alturas)



G. Potencias de trabajo

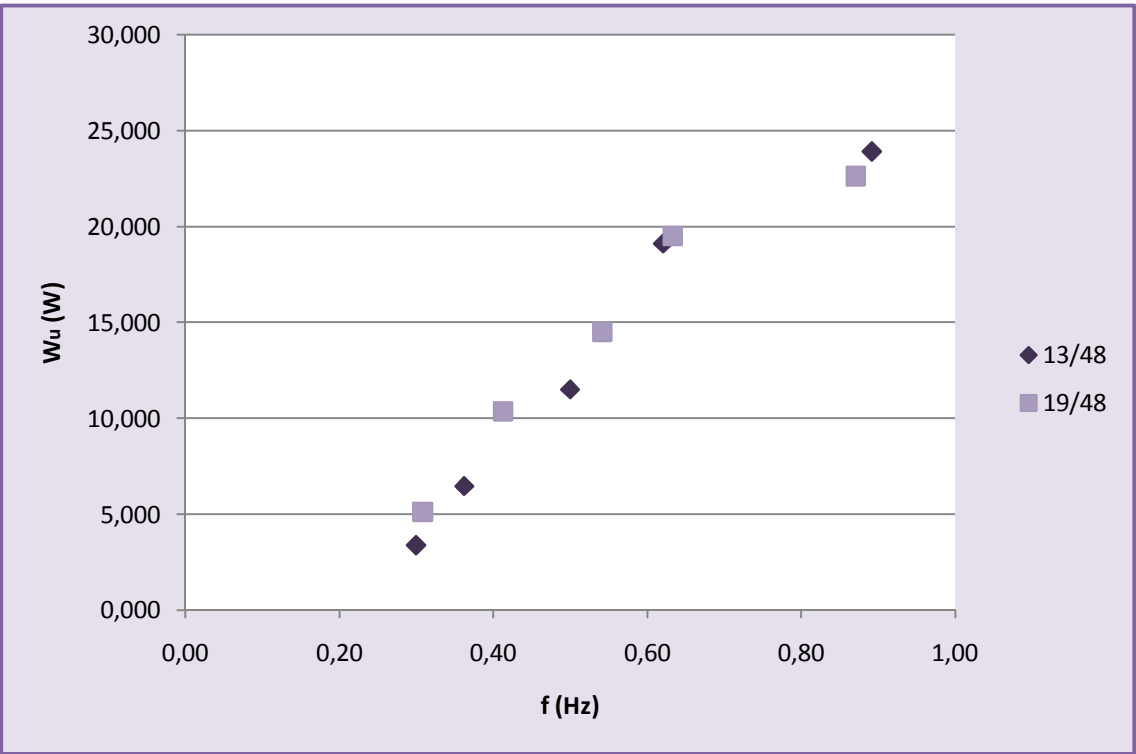


Figura 121. Trabajo frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (63W a distintas alturas)

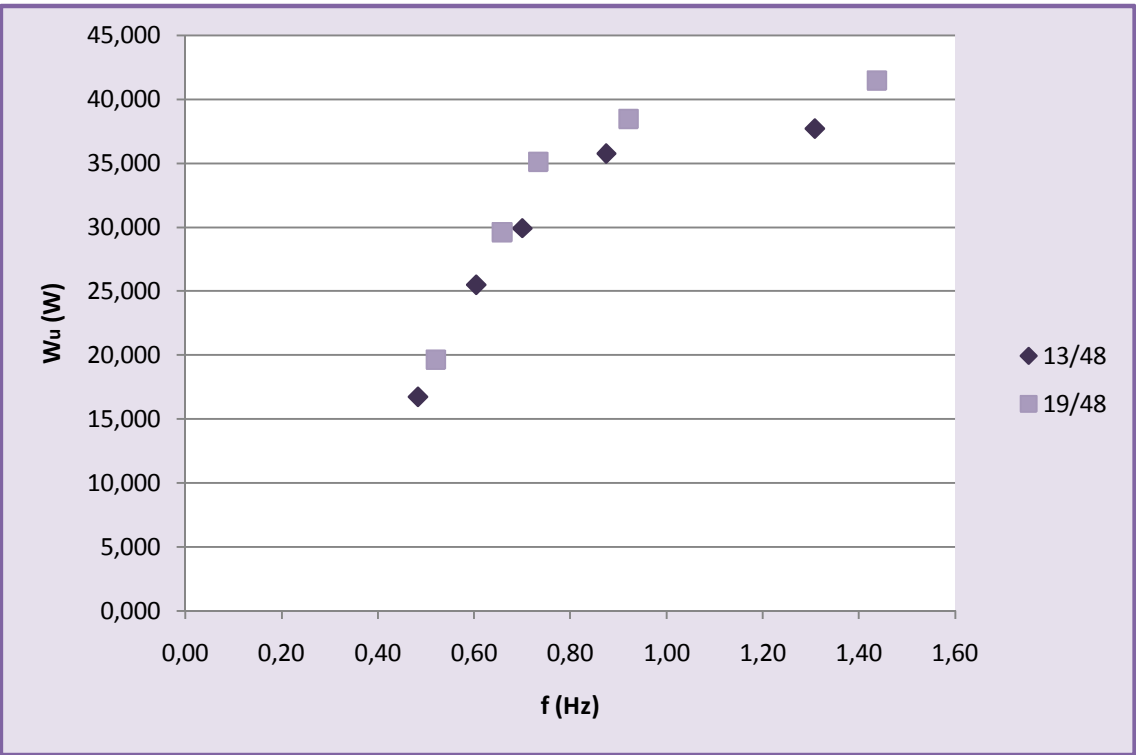


Figura 122. Trabajo frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (90W a distintas alturas)

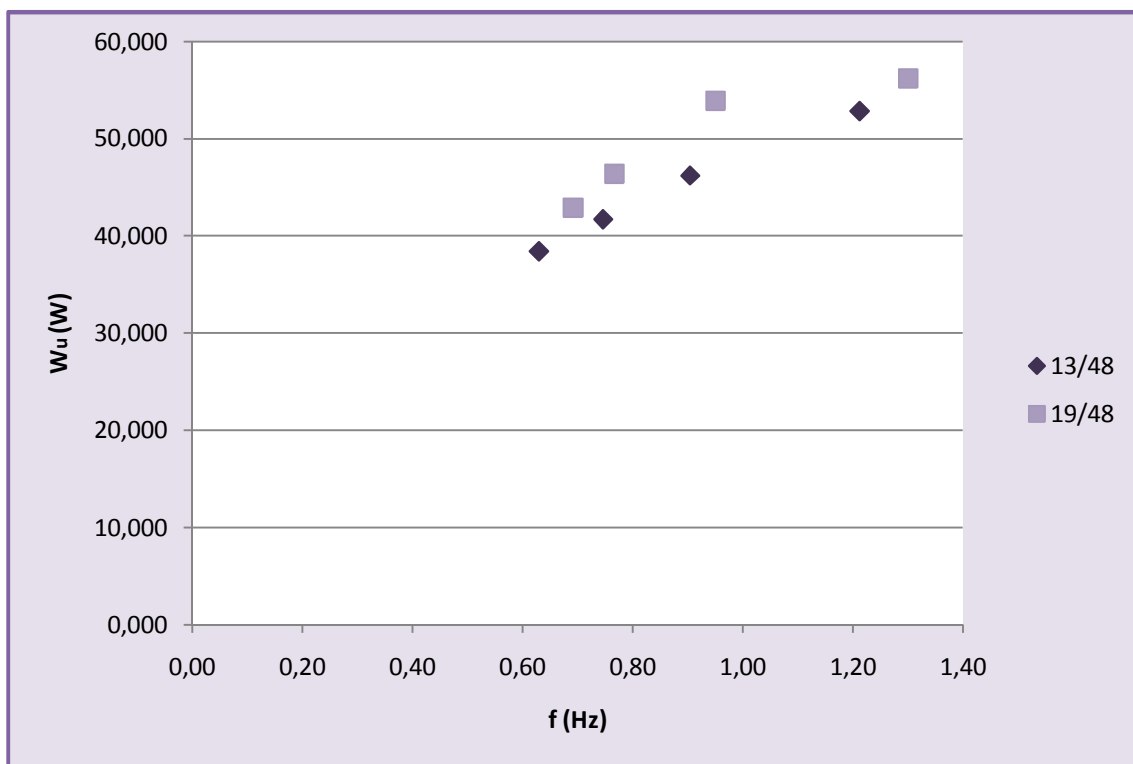


Figura 123. Trabajo frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (117W a distintas alturas)

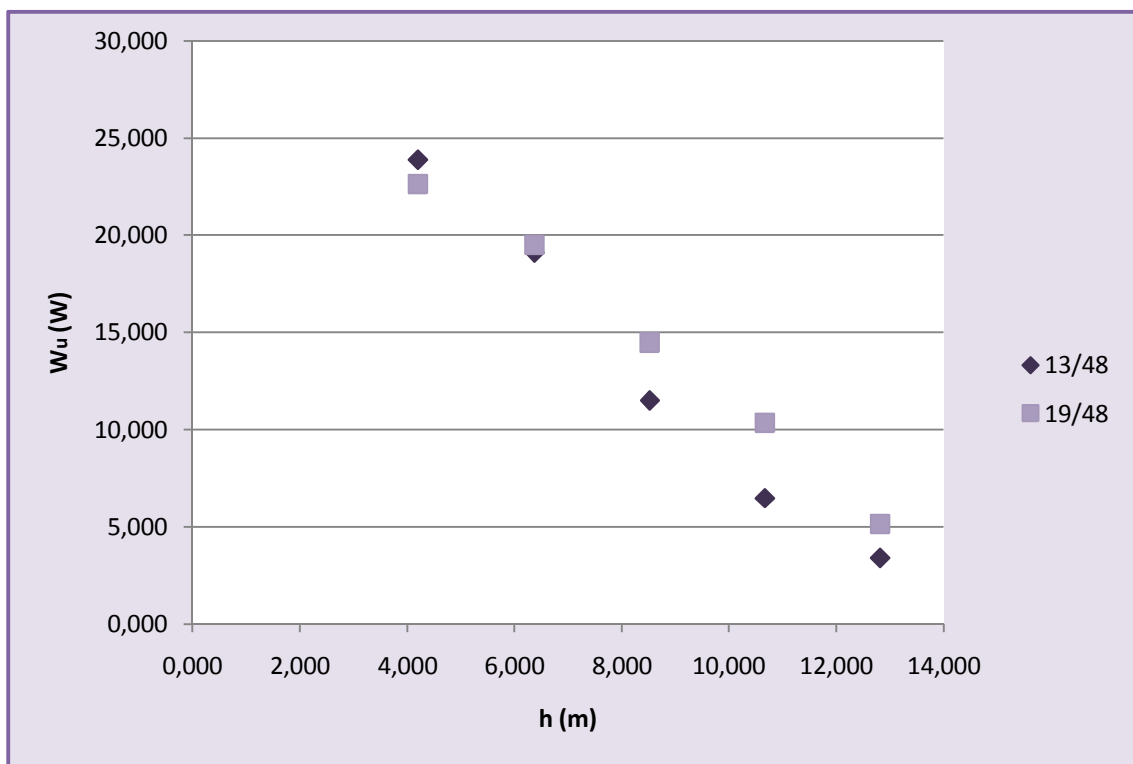


Figura 124. Trabajo frente a altura para potencia eléctrica constante (63W)

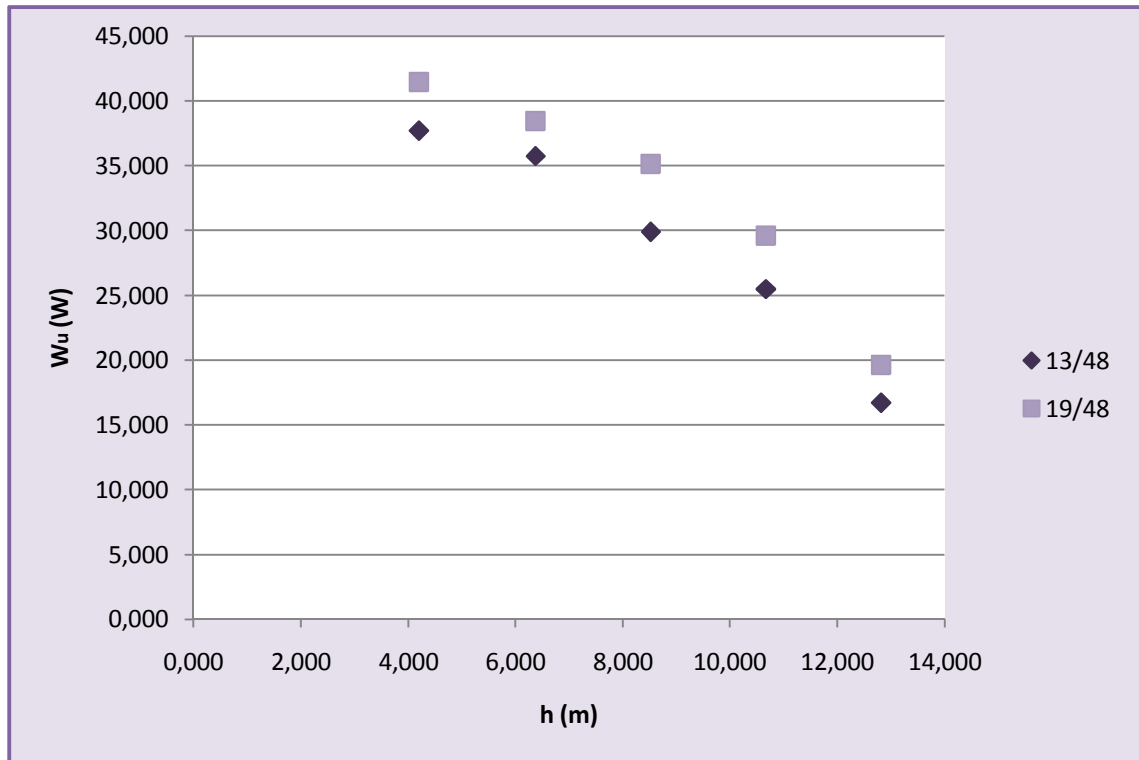


Figura 125. Trabajo frente a altura para potencia eléctrica constante (90W)

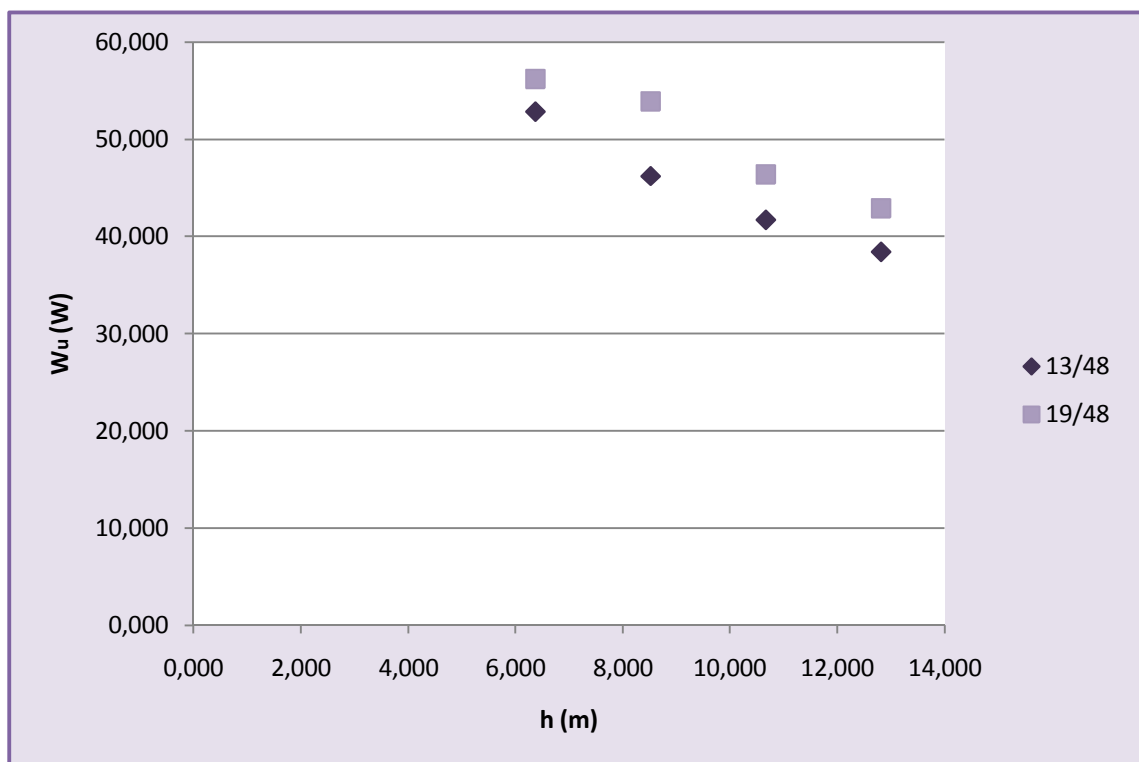


Figura 126. Trabajo frente a altura para potencia eléctrica constante (117W)

H. Rendimiento

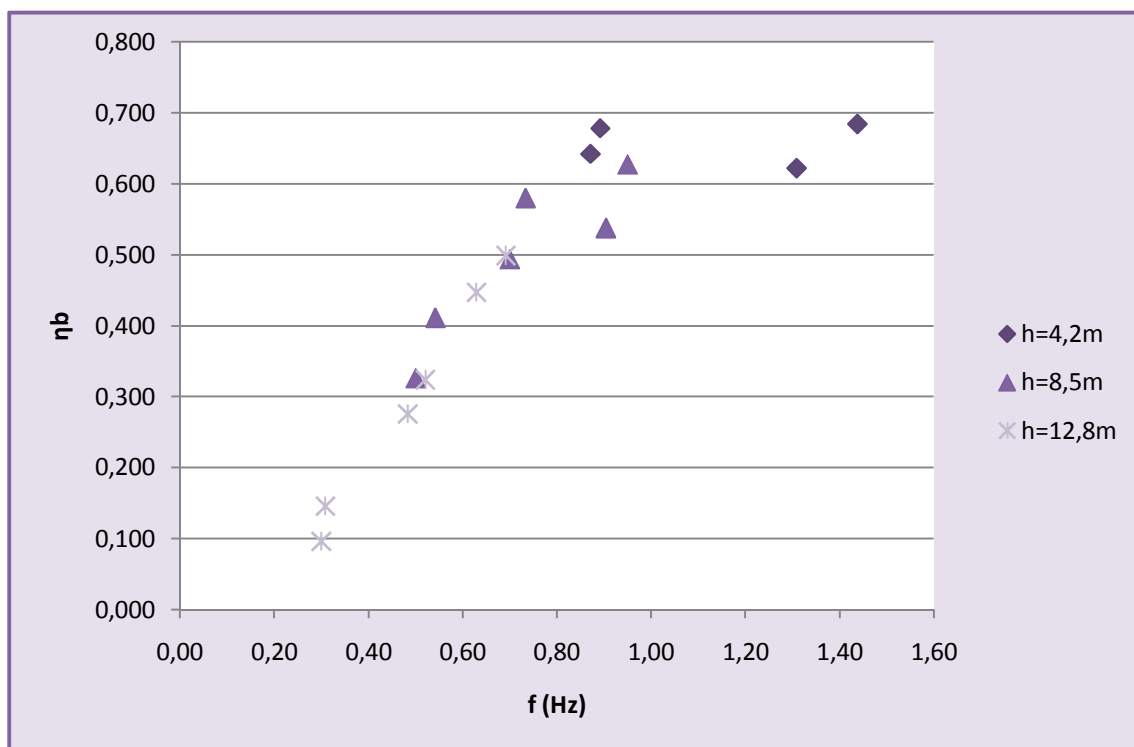


Figura 127. Rendimiento bomba de mecate frente a frecuencia (altura constante)

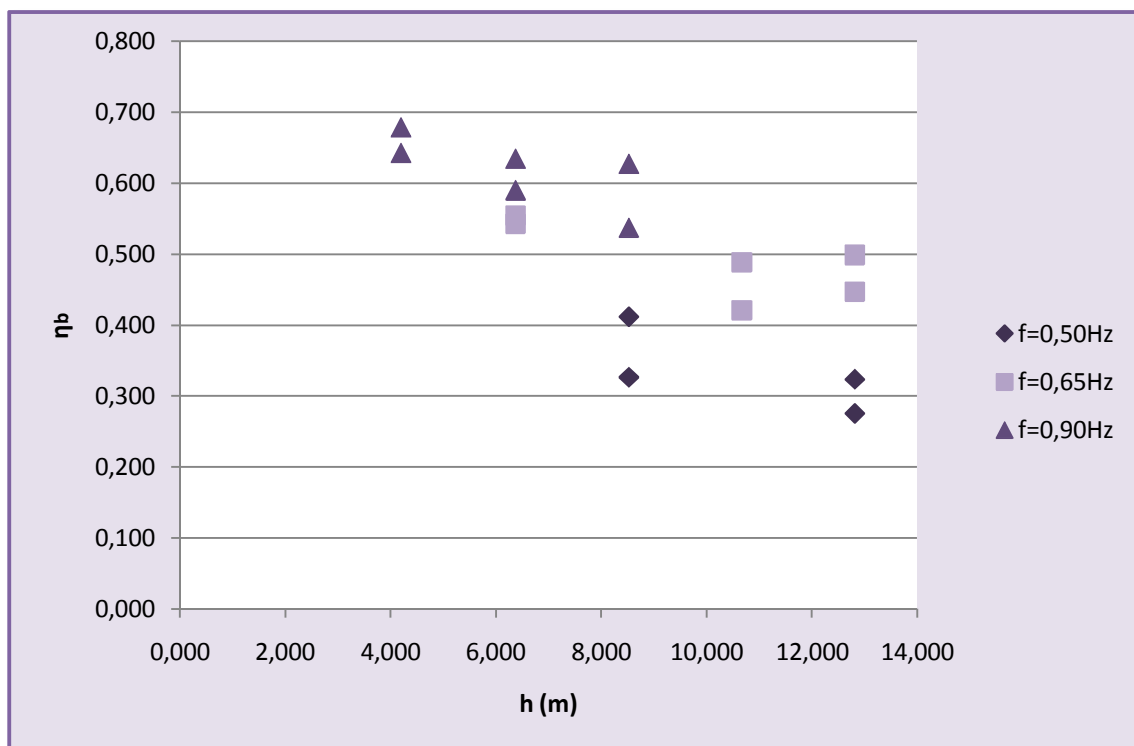


Figura 128. Rendimiento bomba de mecate frente a altura (frecuencia constante)

I. Fuerza de rozamiento

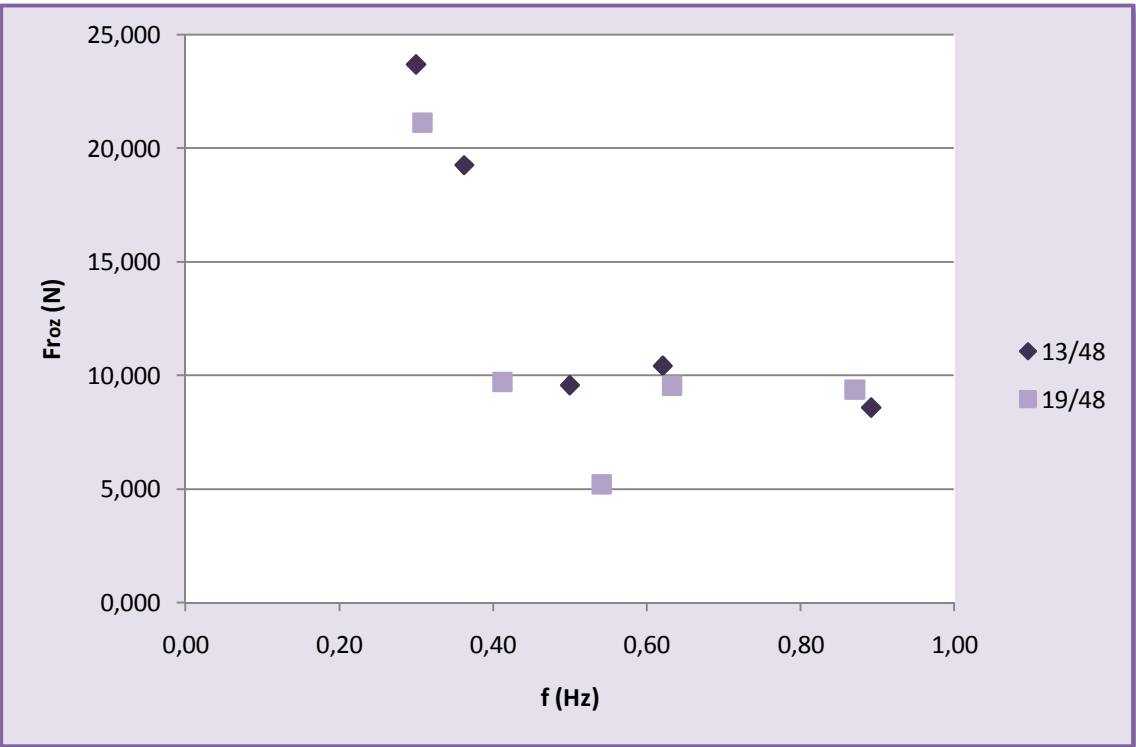


Figura 129. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (63W)

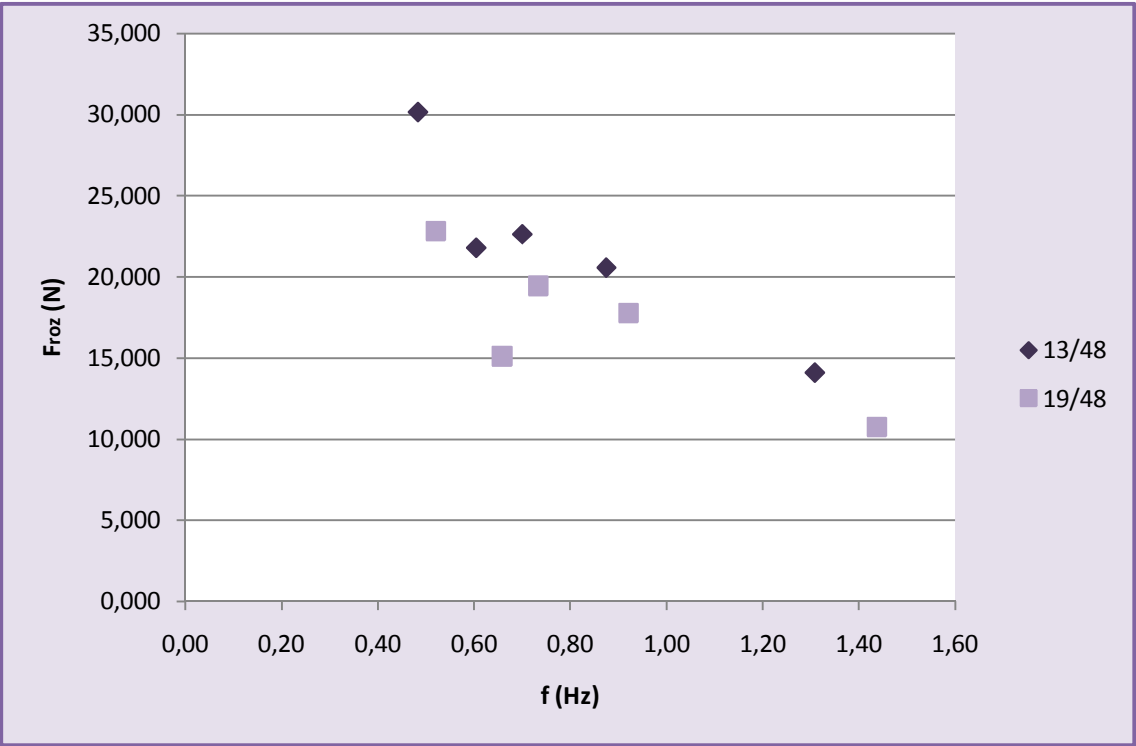


Figura 130. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (90W)

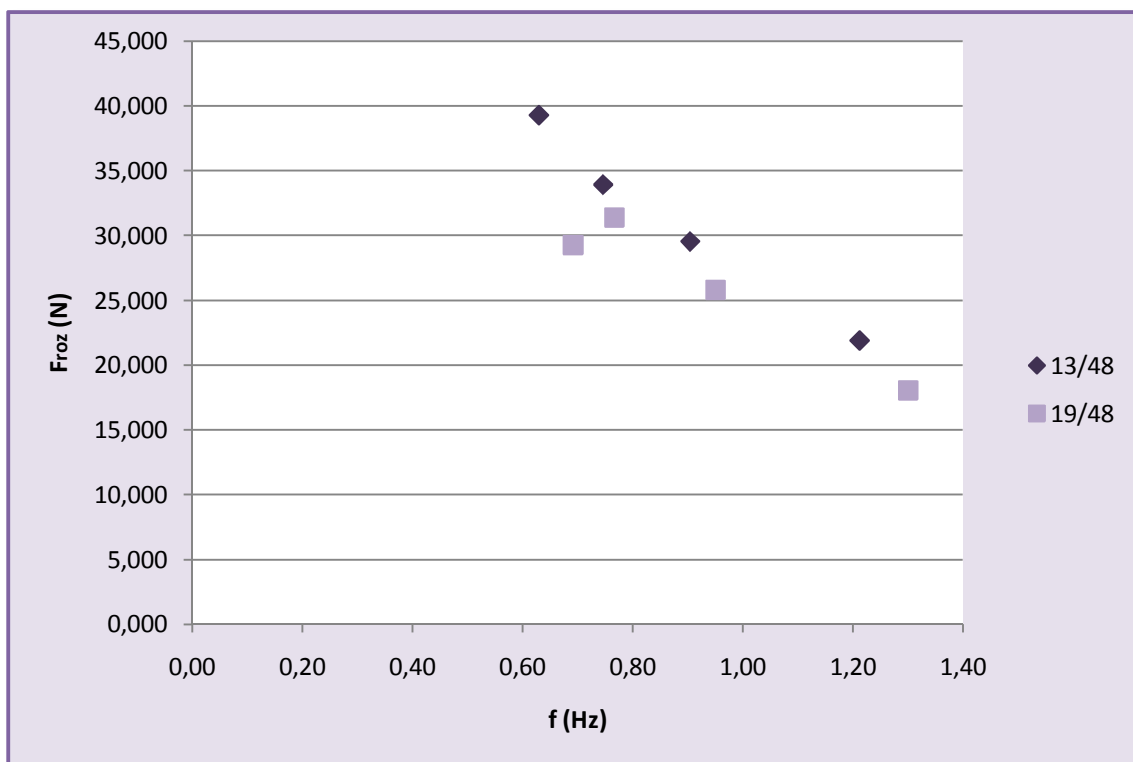


Figura 131. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia para potencia eléctrica constante (117W)

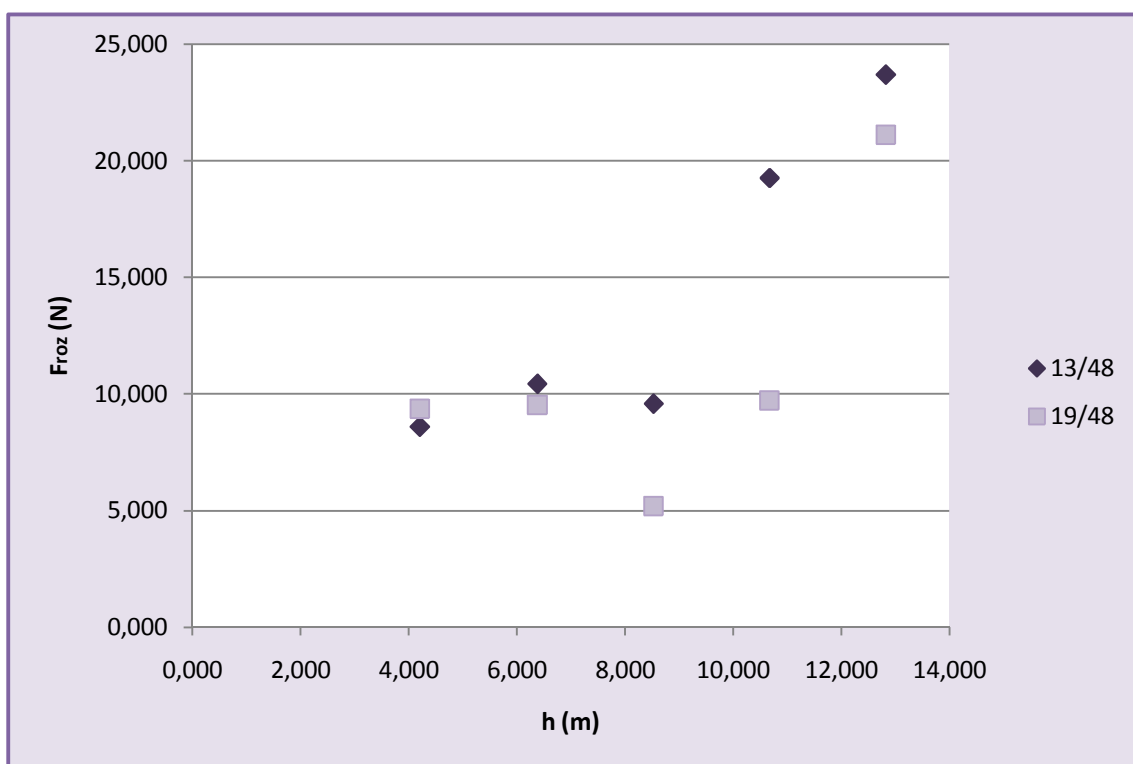


Figura 132. Fuerza de rozamiento frente a altura para potencia eléctrica constante (63W)

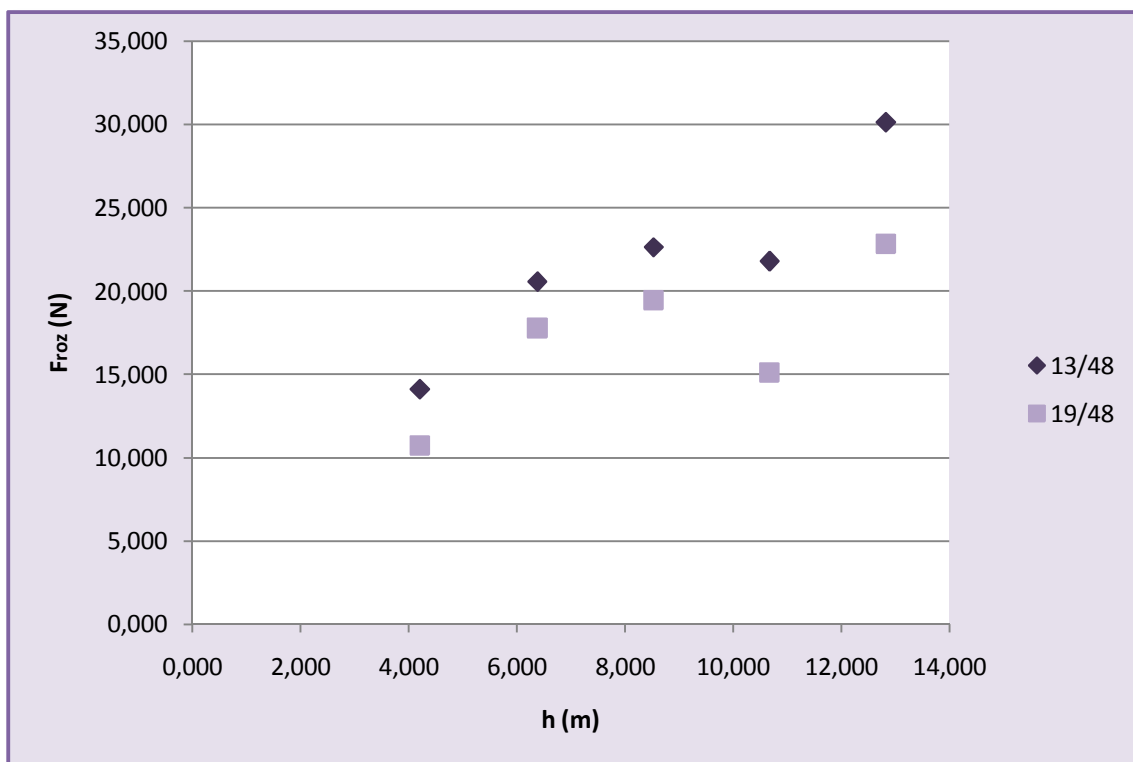


Figura 133. Fuerza de rozamiento frente a altura para potencia eléctrica constante (90W)

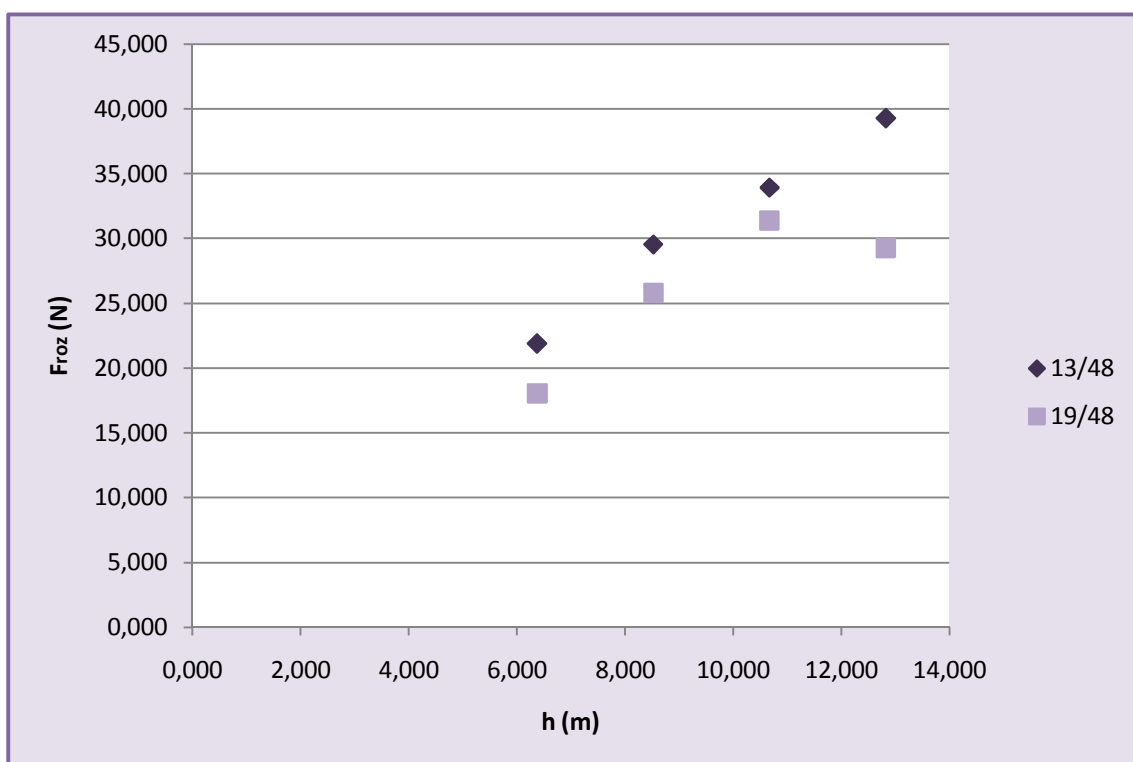


Figura 134. Fuerza de rozamiento frente a altura para potencia eléctrica constante (117W)

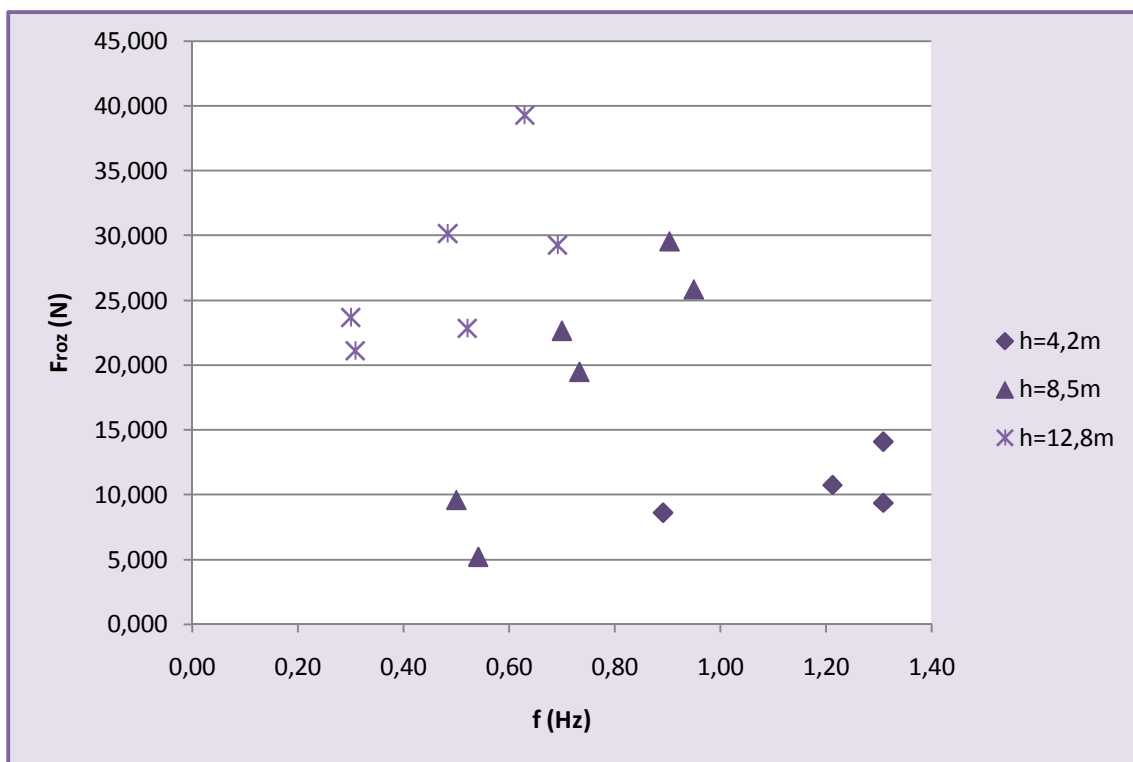


Figura 135. Fuerza de rozamiento frente a frecuencia (altura constante)

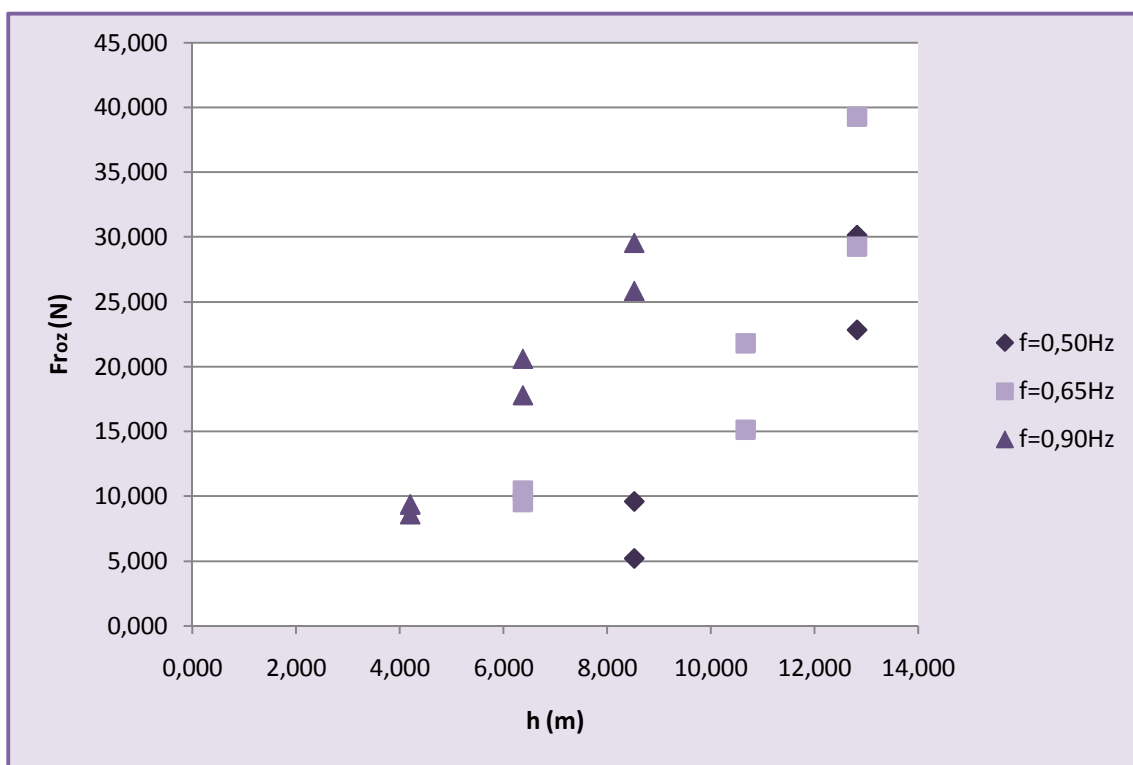


Figura 136. Fuerza de rozamiento frente a altura (frecuencia constante)

X. Comparación de las distintas configuraciones de la bomba de mecate

En el primer caso, se obtuvo una comparación de las pruebas que se realizaron sin el sistema de frenado. Con la configuración manual se utilizó un metrónomo para mantener la frecuencia constante, mientras que en el motor se fijó la posición del acelerador. La gráfica que se muestra presenta el caudal para diferentes velocidades angulares en la polea motriz, presentando una curva ascendente, en ambos casos el comportamiento fue el mismo, lo que llevó a la confirmación que dependiendo del número de vueltas de la rueda motriz el sistema era capaz de extraer una cantidad de agua determinada.

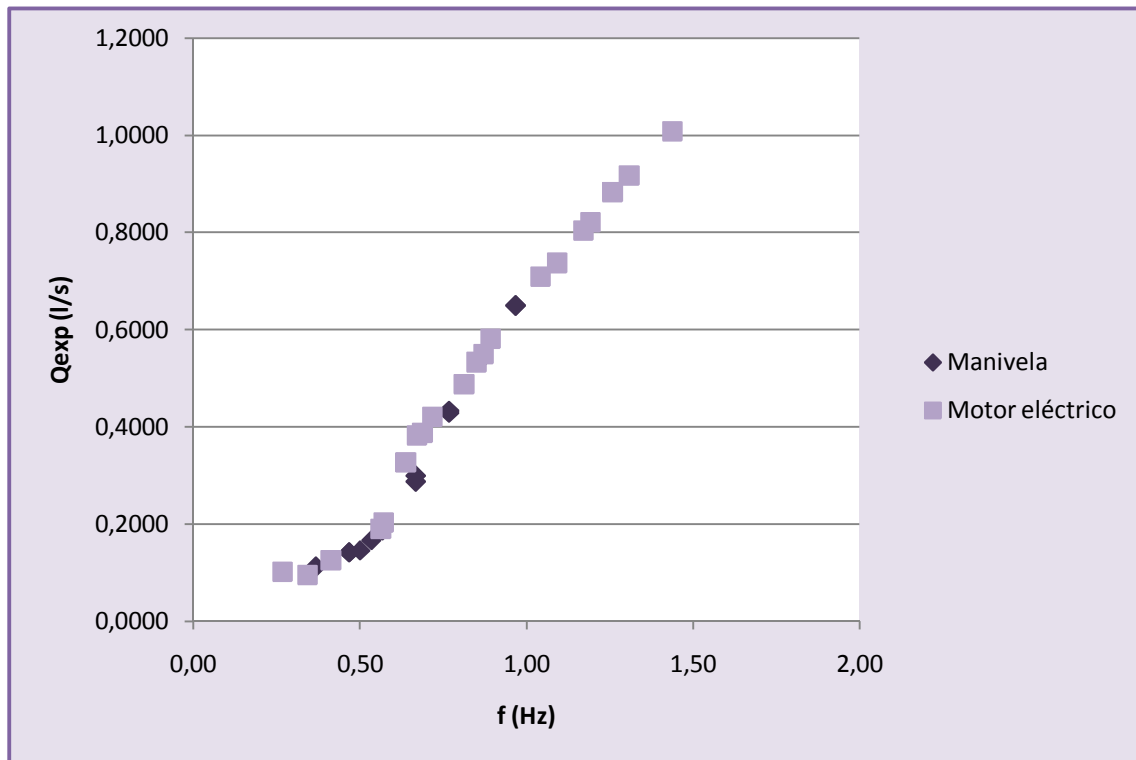


Figura 137. Comparación caudal frente a frecuencia con configuración manual y motorizada

Ensayo, modelado y motorización de bombas de mecate

En la segunda gráfica, se compara el caudal obtenido con todas las configuraciones para diferentes alturas. Hay que destacar que sólo con la configuración motorizada la potencia permaneció constante durante toda la prueba. En este caso se puede observar como el motor eléctrico permite extraer mayores caudales, no pudiendo ser alcanzados con las otras configuraciones.

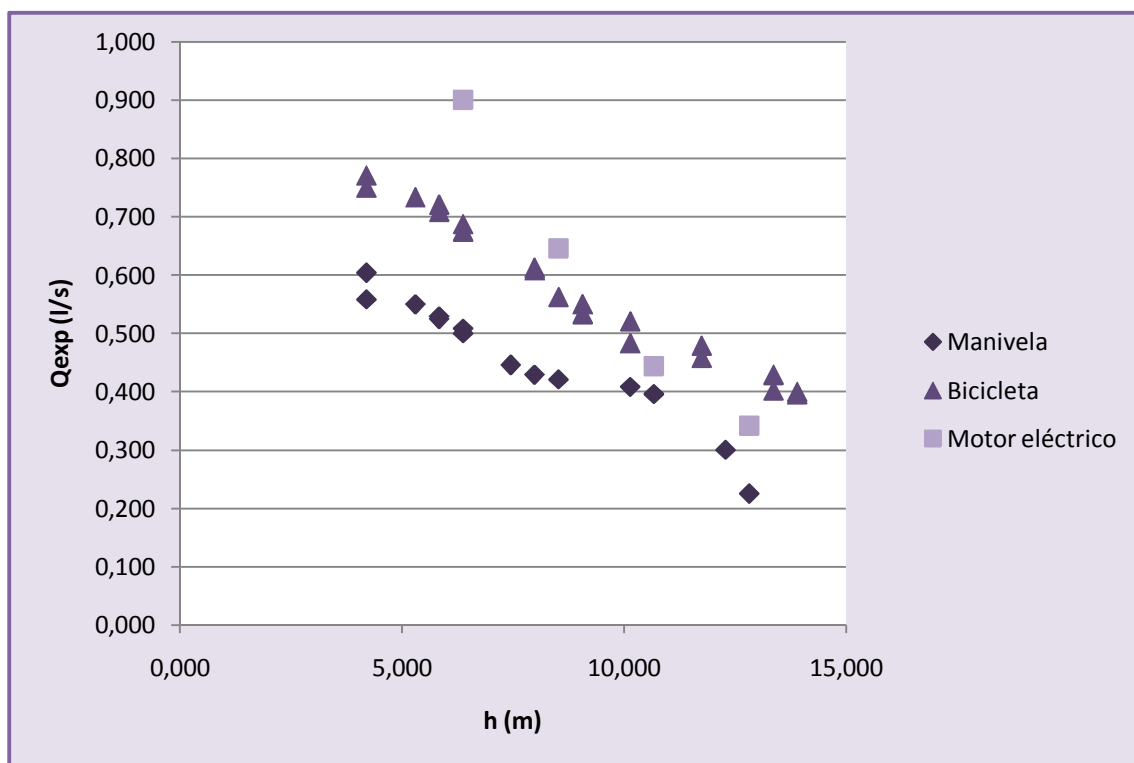


Figura 138. Comparación caudal frente a altura con configuración manual, con bicicleta y motorizada